



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2014

**Ana Patrícia Coelho
Pereira da Silva**

Revestimentos do início do século XX



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2014

**Ana Patrícia Coelho
Pereira da Silva**

Revestimentos do início do século XX

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação da Doutora Ana Fragata da Costa, Estagiária de pós-doutoramento em acolhimento no Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O júri

Presidente

Professor Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro
de Moraes
Professor auxiliar, Universidade de Aveiro

Doutor Luís Filipe Mariz de Matos Ferreira
Investigador Auxiliar, GeoBioTec, Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

À professora Doutora Ana Velosa pela sua orientação, partilha de conhecimento, compreensão e pelo seu constante incentivo e motivação durante todo o trabalho realizado.

À Doutora Ana Fragata, pela sua coorientação, apoio e sugestões dadas.

À engenheira Maria Carlos e ao sr.Vitor, por todos os esclarecimentos, disponibilidade e apoio prestados no laboratório.

Um especial obrigada à Susana, à Bea, à Carlota e ao Diogo pelo seu apoio incansável em especial nesta ultima fase. Por toda a companhia, por todas as conversas, por todas as pausas no Dec, pela vossa amizade.

Quero ainda agradecer aos que me acompanharam desde o início do meu percurso académico, à Joana, ao Ricardo e à Alexandra. Um muito obrigada pela vossa amizade ao longo destes bons anos. Por toda a preocupação que sempre tiveram comigo.

Ao Pedro por todo o carinho, paciência e apoio prestados, estando sempre a meu lado.

Aos meus pais um especial obrigada, por me proporcionarem chegar até aqui. Pelo incansável apoio, interesse e preocupação em todas as fases decorridas neste percurso. Por todo o carinho e força desde sempre.

Palavras-chave

Ligantes, Património edificado no início do século XX, Caracterização de argamassas, Cimento natural

Resumo

A conservação do património edificado apresenta hoje em dia um interesse crescente, surgindo assim a necessidade de adquirir mais conhecimentos sobre esta temática.

A presente dissertação tem como finalidade a caracterização de argamassas pertencentes a revestimentos exteriores de edifícios construídos entre o final do século XIX e o início do século XX. Neste contexto, foram realizados um conjunto de ensaios com o objetivo de analisar o comportamento físico-químico e mecânico das amostras recolhidas destes edifícios.

Paralelamente foram desenvolvidas novas argamassas vocacionadas para a renovação dos revestimentos dos edifícios antigos pertencentes a esta época. Estas argamassas devem ter um bom desempenho e garantir a compatibilidade com os materiais já existentes nos edifícios antigos.

keywords

Binders, Built heritage in early 20th century, Mortar characterization , Natural cement

abstract

The conservation of the built heritage presents nowadays a growing interest, emerging so the need to acquire more knowledge on the subject.

The current dissertation is focus on the characterization of mortars belonging to exterior facades of buildings constructed between the late nineteenth century and the early twentieth century. In this context, a set of tests were performed with the aim of analyzing the physical-chemical and mechanical behavior of the samples taken of these buildings.

In parallel new vocation mortars were developed with the main goal of renovation the coatings of the old building to this period. These mortars should have a good performance and ensure compatibility with existing materials in old buildings.

These mortars should have a good performance and ensure compatibility with existing materials in old buildings.

ÍNDICE

Índice de Figuras	IV
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento teórico	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Ligantes.....	7
2.1. Argamassas	7
2.2. Classificação e tipos de ligantes	7
2.3. História da descoberta dos ligantes.....	8
2.4. Ligantes aéreos	11
2.5. Ligantes hidráulicos.....	11
2.5.1. Cais hidráulicas.....	12
2.5.2. Cimentos.....	12
2.5.2.1. Cimento Portland.....	12
2.5.2.2. Cimento Natural	14
3. Edifícios início do século XX.....	19
3.1. Património edificado em Portugal	19
3.2. Casos de estudo.....	20
3.2.1. Teatro Nacional São João	20
3.2.2. Mercado do Bolhão.....	21
3.2.3. Palácio Oscarshall.....	23
4. Procedimento experimental	27
4.1. Caracterização das argamassas antigas.....	27
4.1.1. Amostragem.....	27
4.1.2. Ensaio nas argamassas dos edifícios em estudo.....	34
4.1.2.1. Determinação da relação agregado/ligante por dissolução ácida	35
4.1.2.2. Granulometria.....	36
4.1.2.3. Composição química – Fluorescência de Raio X (FRX)	37
4.1.2.4. Composição mineralógica – Difractometria de Raio X (DRX)	37
4.1.2.5. Resistência à compressão	38
4.1.2.6. Absorção da água por capilaridade.....	39

4.1.2.7. Índice de secagem.....	41
4.1.2.8. Comportamento aos sais.....	41
4.2. Formulação e caracterização de argamassas de substituição.....	45
4.2.1. Formulações.....	45
4.2.2. Preparação dos provetes	46
4.2.3. Metodologia de cura	47
4.2.4. Ensaios realizados.....	48
4.2.4.1. Massa volúmica aparente seca.....	49
4.2.4.2. Ensaio de espalhamento.....	50
4.2.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico	51
4.2.4.4. Resistência à tração por flexão	52
4.2.4.5. Resistência à compressão	53
4.2.4.6. Profundidade de carbonatação.....	54
4.2.4.7. Absorção da água por capilaridade.....	54
4.2.4.8. Determinação do índice de secagem	55
5. Apresentação e discussão de resultados.....	59
5.1. Análise das argamassas antigas	59
5.1.1. Determinação da relação ligante/agregado por dissolução ácida	61
5.1.2. Análise granulométrica.....	63
5.1.3. Análise Fluorescência de Raios X - FRX.....	69
5.1.4. Análise Difração de Raios X - DRX	72
5.1.5. Análise de resistência à compressão.....	77
5.1.6. Análise da absorção da água por capilaridade	80
5.1.7. Análise índice de Secagem	82
5.1.8. Análise qualitativa e semi-quantitativa de sais solúveis.....	83
5.2. Análise global das argamassas antigas	87
5.3. Análise de argamassas de substituição	90
5.3.1. Caracterização dos materiais	90
5.3.1.1. Análise Visual	90
5.3.1.2. Massa volúmica aparente.....	90
5.3.1.3. Análise mineralógica de NHL 3,5 e cimento Vicat – DRX	91
5.3.1.4. Granulometria agregado	93
5.3.2. Ensaios realizados às argamassas substituição	93

5.3.2.1. Análise da absorção da água por capilaridade	93
5.3.2.2. Análise de índice de secagem	95
5.3.2.3. Análise de resistência à tração por flexão	96
5.3.2.4. Análise resistência à compressão	98
5.3.2.5. Análise profundidade de carbonatação	100
5.3.2.6. Análise do módulo de elasticidade dinâmico	101
5.4. Análise global das argamassas de substituição	103
6. Conclusões e trabalhos futuros	107
7. Referências bibliográficas.....	111

Índice de Figuras

Figura 1- Produção e distribuição de cimento natural em alguns países da Europa (Rocare, 2010).....	14
Figura 2 – Teatro Nacional São João (IGESPAR, s.d).....	21
Figura 3 – Mercado Bolhão (IGESPAR, s.d.)	23
Figura 4 – Palácio Oscarshall (Oscarshall, s.d.)	24
Figura 5 - Locais de recolha de amostras da fachada poente - TNSJ	28
Figura 6 - Locais de recolha de amostras da fachada nascente - TNSJ	28
Figura 7 - Locais de recolha de amostras da fachada principal - TNSJ	29
Figura 8 - Amostras com apresentação de oxidação armadura	33
Figura 9 - Amostras compostas com várias camadas de argamassa.....	33
Figura 10 - Causas da degradação das argamassas	33
Figura 11- Diagrama de ensaios realizados nas amostras recolhidas	35
Figura 12 - Registo fotográfico ensaio de dissolução ácida	36
Figura 13 - Amostras com argamassa de confinamento para ensaio de resistência à compressão	38
Figura 14 - Ensaio de absorção da água por capilaridade	40
Figura 15 – Preparação do ensaio de comportamento a sais solúveis	43
Figura 16 - Ensaio de comportamento aos sais realizado à amostra T-4	44
Figura 17 - Avaliação semi-quantitativa de iões de sais solúveis	44
Figura 18 – Várias fases do processo de execução de argamassas.....	47
Figura 19- Condicionamento de provetes.....	48
Figura 20 – Registo fotográfico do ensaio de massa volúmica aparente.....	49
Figura 21 – Registo fotográfico do ensaio de espalhamento.....	50
Figura 22- Registo fotográfico ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	52
Figura 23 – Registo fotográfico do ensaio de resistência à flexão	53
Figura 24- Registo fotográfico ensaio de resistência à compressão	53
Figura 25 - Registo fotográfico ensaio de carbonatação dos provetes	54
Figura 26 – Registo fotográfico ensaio de absorção da água por capilaridade	55
Figura 27- Fração solúvel e resíduo após dissolução ácida - Fachada poente, principal e nascente TNSJ	61
Figura 28- Fração solúvel e resíduo após dissolução ácida - Amostras TNSJ	62
Figura 29- Fração solúvel e resíduo após dissolução ácida - Mercado do Bolhão.....	63

Figura 30- Curvas granulométricas - Fachada poente TNSJ	64
Figura 31- Curvas granulométricas - Fachada principal TNSJ	65
Figura 32- Curvas granulométricas - Fachada nascente TNSJ	65
Figura 33- Curvas granulométricas - amostras TNSJ	66
Figura 34-Registo fotográfico do resultado do ensaio de granulometria a algumas amostras	68
Figura 35 Curvas granulométricas - Mercado do Bolhão.....	68
Figura 36- Resistência à compressão - amostras TNSJ	77
Figura 37 - Resistência à compressão - Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall	79
Figura 38- Exemplos de diferentes roturas após ensaio de resistência à compressão	79
Figura 39- Coeficientes de capilaridade - amostras TNSJ	80
Figura 40- Coeficientes de capilaridade - amostras Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall	81
Figura 41- Índice de secagem - amostras do TNSJ	82
Figura 42- Índice de secagem - amostras Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall	83
Figura 43 - Resultados análise quantitativa a sulfatos, cloretos e nitratos	85
Figura 44 - Resultados dos indicadores colorimétricos	86
Figura 45-Análise mineralógica por DRX para a cal hidráulica NHL3,5	92
Figura 46-Análise mineralógica por DRX para o cimento natural Vicat	92
Figura 47- Curva granulométrica areia de rio	93
Figura 48-Resultados dos coeficientes de capilaridade para as formulações realizadas	94
Figura 49- Resultados do índice de secagem para as formulações realizadas.....	95
Figura 50- Resultados da resistência à flexão das formulações realizadas	96
Figura 51-Resultados da resistência à compressão das formulações realizadas	99
Figura 53- Profundidade de carbonatação	101
Figura 53 - Módulo de elasticidade dinâmico das formulações	102

Índice de Tabelas

Tabela 1- Listagem de amostras recolhidas - TNSJ	30
Tabela 2 - Listagem de amostras recolhidas - Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall ...	34
Tabela 3 - Avaliação qualitativa da presença iões de sais solúveis	44
Tabela 4 - Traços volumétricos das argamassas realizadas e respetivas designações.....	46
Tabela 5 - Ensaios realizados e respetiva norma	49
Tabela 6 - Listagem de amostras e respetivos ensaios realizados	60
Tabela 7 - Análise de resultados por FRX - amostras TNSJ	69
Tabela 8 - Análise de resultados por FRX - amostra do Mercado o Bolhão	71
Tabela 9- Análise de resultados por FRX - amostra Palácio Oscarshall	71
Tabela 10 - Análise de resultados por DRX - amostras fachada poente do TNSJ	72
Tabela 11- Análise de resultados por DRX - amostras da fachada principal e nascente do TNSJ	73
Tabela 12 - Análise de resultados por DRX - amostras do TNSJ	73
Tabela 13 - Análise de resultados por DRX - amostras do Mercado do Bolhão.....	75
Tabela 14- Análise de resultados por DRX - amostra do Palácio Oscarshall	76
Tabela 15 - Análise qualitativa de sais solúveis	84
Tabela 16- Análise semi-quantitativa de sais solúveis (mg/l)	85
Tabela 17 - Resistência à compressão máxima, mínima e média	88
Tabela 18 - Coeficientes de capilaridade e índice de secagem máximos, mínimos e médios	88
Tabela 19 Massa volúmica aparente dos materiais utilizados	90
Tabela 20- Médias e desvio padrão da resistência à flexão das diferentes formulações.....	96
Tabela 21- Médias e desvio padrão da resistência à compressão das diferentes formulações	98
Tabela 22 - Resultados profundidade de carbonatação	100

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento teórico

Ao longo do tempo grande parte do património nacional poderá ter sido perdido por falta de intervenções e de conhecimentos ao nível da reabilitação, sendo grande parte deste constituído por edifícios antigos. À medida que as sociedades evoluem, cresce a consciência de que é preciso conservar e preservar o património construído, atribuindo assim às construções antigas valor cultural.

No último século as intervenções em edifícios antigos têm assumido um papel relevante na maioria dos países Europeus. Em Portugal, esta questão surgiu apenas algumas décadas atrás e concentra-se principalmente na recuperação do património monumental e nas fachadas de edifícios pertencentes a centros históricos de cidades (Freire, et al., 2008).

As construções existentes, em geral, vão-se degradando com o tempo através de um processo muitas vezes natural, os revestimentos exteriores de fachadas não são exceção. São elementos que além de terem uma função protetora, possuem muitas vezes uma função decorativa de grande relevância para a imagem do monumento (Tavares e Veiga, 2005).

Uma das atividades mais frequentes em intervenções de conservação e restauro é a substituição de argamassas deterioradas, tornando-se assim fundamental definir as principais características que as argamassas de substituição devem ter, sendo importante conhecer a natureza do ligante utilizado. A nova argamassa deve responder às solicitações exigidas de modo a garantir a compatibilidade com os materiais existentes no edifício.

A identificação da argamassa original evidencia um grande interesse para obter um enquadramento histórico, espacial e das tecnologias empregues do edifício que se está analisar, pois certos materiais são característicos de determinadas épocas e locais. O estudo dos revestimentos antigos permite encontrar soluções adequadas para a reabilitação desses revestimentos tradicionais.

Contudo, com os processos de industrialização, novos ligantes para argamassas foram surgindo provocando um gradual desaparecimento de revestimentos tradicionais, nomeadamente argamassas com base em cal aérea, por argamassas executadas com ligantes como o cimento Portland (Veiga e Carvalho, 2002).

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos a caracterização de argamassas utilizadas em revestimentos de edifícios construídos entre o final do século XIX e o início do século XX, com vista à reabilitação de edifícios dessa época.

Este estudo envolve a análise de revestimentos exteriores de três edifícios, Teatro Nacional São João e o Mercado do Bolhão, ambos localizados no Porto, e o Palácio Oscarshall situado na Noruega.

Serão recolhidas amostras de argamassas destes edifícios, com objetivo de efetuar um conjunto de análises e ensaios contemplando a caracterização química e mineralógica com ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX), Difractometria de Raios X (DRX), dissolução ácida, granulometria do agregado e comportamento a sais solúveis. Assim como uma caracterização física e mecânica com ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade às argamassas existentes.

Paralelamente pretende-se também a formulação de argamassas vocacionadas para a renovação de revestimentos de paredes destes edifícios antigos. Realizando-se assim, formulações para argamassas de substituição e também alguns ensaios para a sua caracterização.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No capítulo 1 apresenta-se um breve enquadramento histórico, assim como os objetivos e a estrutura deste trabalho. O capítulo 2 será elaborado com base numa pesquisa bibliográfica, em que a temática sobre ligantes encontra-se em foco. Apresentando assim, o seu contexto relativamente às argamassas, bem como uma breve parte histórica sobre a sua descoberta. Ainda neste capítulo apresenta-se os vários tipos de ligantes existentes, dando especial destaque ao cimento natural.

O capítulo 3 encontra-se dividido em duas partes, na primeira parte é feita uma breve apresentação ao património edificado em Portugal com especial interesse em edifícios construídos entre o final do século XIX e o início do século XX. Na segunda parte

apresentam-se os edifícios em estudo nesta dissertação, sendo estes pertencentes á época em causa.

No capítulo 4 é descrito todo o procedimento experimental relativo aos ensaios necessários para a caracterização das argamassas provenientes dos edifícios em estudo. Assim como, as formulações e os procedimentos efetuados ao desenvolvimento e caracterização de novas argamassas passíveis de ser compatíveis com o património edificado antigo.

O capítulo 5 é dividido em duas partes, em que na primeira parte são apresentados e analisados todos os resultados decorridos dos ensaios necessários à caracterização de argamassas antigas. Com destaque para a realização de uma análise global ao conjunto de ensaios. Na segunda parte, são apresentados e discutidos os resultados das formulações executadas, assim como uma análise global.

Por fim, no capítulo 6 será realizada uma conclusão geral de todo o trabalho decorrido nesta dissertação, assim como a sugestão de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

LIGANTES

2. LIGANTES

2.1. Argamassas

Ao longo do tempo o Homem através de recursos que a natureza lhe oferecia e da sua experiência, aprimorou as suas construções. As argamassas são produtos da construção muito antigos, ultrapassados apenas pela madeira, pedra e lama, sendo que foram os primeiros materiais a ser usados pelo Homem (Duarte et al., 2009).

Uma argamassa consiste na simples mistura de agregados finos (areias), água e um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos. Adicionalmente, poderá ainda incorporar aditivos e adjuvantes.

Em proporções adequadas, esta mistura deve ser homogênea e estar de acordo com o tipo de argamassa pretendida. Uma das características que as argamassas devem apresentar é uma boa plasticidade, quando recém-misturadas. Após endurecerem possuem rigidez, resistência e aderência (Paulo, 2006).

Podem distinguir-se três grandes grupos de argamassas: de alvenaria, de revestimento (estruque e reboco), e de suporte para pavimentos (Veiga, 1998).

As argamassas de revestimentos exteriores devem desempenhar adequadamente determinadas características, como trabalhabilidade, resistência à fendilhação, capacidade de impermeabilização, permeabilidade ao vapor de água, aderência ao suporte, resistência aos choques, compatibilidade com o suporte, durabilidade e especto estético (Veiga, 1998).

2.2. Classificação e tipos de ligantes

Uma das matérias-primas usadas na constituição das argamassas são os ligantes. A designação de ligante deve-se à propriedade que tem de poder unir uma porção elevada de inertes, como areia, britas, gados, etc., conferindo ao conjunto grande coesão e resistência, o que os torna aptos a serem utilizados na construção (Elsen, 2006).

Segundo Sousa Coutinho (1997), os ligantes podem dividir-se em três categorias: hidráulicos, aéreos e orgânicos. As argamassas podem ser constituídas por ligantes de cal, gesso ou cimento, e dependendo das propriedades pretendidas a sua composição pode variar

consideravelmente. No grupo dos ligantes de cal são considerados dois subgrupos, a cal aérea e a cal hidráulica.

A terra, o gesso e a cal foram os três ligantes tradicionalmente mais comuns durante a história da construção até cerca de dois séculos atrás, quando o seu uso foi gradualmente substituído por diferentes tipos de cimento natural ou mais tarde por Cimento Portland, que é hoje o tipo de ligante mais dominante na indústria da construção (Elsen, 2006).

2.3.História da descoberta dos ligantes

Existem evidências de uso de argamassas em diferentes locais do planeta, como resultado da calcinação de pedra calcária, em fornos muito rudimentares, utilizando madeira como combustível (Duarte et al., 2009).

O uso da cal na construção data de tempos quase imemoriais, esta tradição terá sido transmitida através de várias civilizações ancestrais, que apesar de desconhecerem as suas propriedades, com experiência conseguiram aprimorar a qualidade das suas construções. É inevitável constatar que este terá sido o primeiro ligante a ser usado em argamassas.

O fabrico de argamassas hidráulicas remonta a civilização romana, com as famosas pozolanas naturais, cinzas vulcânicas ricas em sílica e alumina, que reagiam com hidróxido de cálcio, conferindo-lhes grandes propriedades hidráulicas (Moropoulou et al., 2003).

Contudo, nas zonas onde não existiam regiões vulcânicas, e como tal, ausência desta matéria-prima, eram utilizados materiais cerâmicas para garantir as condições de hidraulicidade (Lopes e Ribeiro, 2007).

Embora se soubesse fabricar argamassas hidráulicas com base em pozolanas, as causas da hidraulicidade permaneceram durante muito tempo desconhecidas, não sendo entendidas as razões pelas quais algumas cais endureciam debaixo de água.

Segundo Sousa Coutinho (1997), quem primeiro chamou a atenção para a importância da matéria-prima foram os artífices toscanos V.Biringuccio e G.Maggi que, em 1540 e 1564, respetivamente, afirmavam que a cal proveniente de determinada rocha, calcário margoso, fazia presa dentro de água.

A mesma conclusão foi atingida por John Smeaton, inspirado por uma viagem à Holanda, com o intuito de estudar estruturas marinhas, que resultou no uso de argamassas hidráulica

para a construção do farol Eddystone (1756-1759), em Inglaterra, este projeto é muitas vezes considerado como o ponto de partida para o uso e pesquisa de ligantes hidráulicos modernos (Heinemann, 2013).

Após uma longa série de experiências em que se variou a natureza da matéria-prima, afirmava-se que o produto obtido da calcinação do calcário com a argila, adquiria um melhor índice de qualidade para obras hidráulicas.

Em 1780, o sueco Bergmann ao analisar o calcário encontrou algumas percentagens de manganésio, ao qual atribuiu as propriedades hidráulicas da cal (Coutinho, 1997).

Naquela época, James Parker obteve a patente para o ligante hidráulico natural, fabricado em 1796, ao qual chamou de "cimento água", também conhecido como "cimento Inglês" e mais tarde chamado de "cimento romano", e parece ter sido inspirado pelo livro de Smeaton publicado cinco anos antes (Charola e Henriques, 2000; Heinemann, 2013).

Mais tarde, em 1813, o professor da escola de Minas de Paris, Collet-Descotils ao analisar calcários para a fabricação de cal hidráulica, observou que estes quando eram atacados pelos ácidos deixavam um resíduo de sílica insolúvel, mas ao contrário quando a cal hidráulica atacada pelos ácidos não deixava praticamente nenhum resíduo de sílica. Este acontecimento mostrava que durante a cozedura tinha havido combinação da sílica com cal. Este pressuposto abriu assim o caminho para o cimento artificial (Coutinho, 1997).

Louis Vicat provou em 1812 que a hidraulicidade destes ligantes deveu-se ao resultado da queima simultânea de calcário e argila, após numerosas análises químicas mostrou que todas as cals hidráulicas provinham de calcários argilosos e que, reciprocamente, todos os calcários que continham uma proporção conveniente de argila podiam servir para obter cals hidráulicas. Compreendeu portanto que para se obter ligantes hidráulicos era necessário que a argila estivesse já incorporada no calcário. Ao misturar argila com calcários finamente moídos e cozendo essa mistura, obtinha o que naturalmente se conseguia pela cozedura dos calcários argilosos. Devido a esta descoberta, Vicat, é considerado o inventor do cimento artificial (Elsen et al., 2001).

No entanto, em 1818 Maurice Saint-Léger, seguindo o conselho de Vicat, patenteava um processo de obter cal hidráulica artificial cozendo, a temperaturas na ordem de 1000°C, misturas devidamente proporcionadas de calcário e argila (Coutinho, 1997).

Em Moulineaux, perto de Paris, é fundada a primeira fábrica de cal hidráulica artificial em 1826.

Em 1824 J. Aspdin patenteava o mesmo processo de obter cal hidráulica artificial mas diferia de Vicat por usar temperaturas de calcinação mais elevadas. No entanto, só em 1844 o seu associado Isaac Charles Johnson descobriu que as elevadas resistências obtidas por Aspdin se deviam a fusão de parte da matéria-prima, a temperaturas de 1400°C e 1500°C, o que permitia a formação de silicato de tricálcico, tal como hoje se sabe, o componente nobre do cimento Portland (Coutinho, 1997).

Entretanto, com esta prosperidade na produção de ligantes, os fornos também acompanhavam este crescimento, tornando-se por isso mais evoluídos. Inicialmente eram usados fornos verticais e horizontais. Porém em 1903, Edison construía um forno rotativo com 45 m de comprimento, no qual os gases de combustão eram aplicados no aquecimento prévio da matéria-prima (Coutinho, 1997).

Apesar da intensa investigação, os detalhes da composição química do cimento Portland ainda eram desconhecidos na década de 1920. Só no final do século XIX, a sua utilização aumentou e começou a ser investigada a utilização de outras matérias-primas como as escórias (Heinemann, 2013).

Assim sendo, o cimento Portland torna-se o ligante dominante na indústria da construção, sendo o sucessor da cal hidráulica que foi utilizada principalmente durante o século XIX (Elsen et al., 2001).

Na transição do século XIX, o alemão W. Michaelis patenteou um cimento Portland resistente aos sulfatos, com um teor de óxido de alumínio baixo, o chamado Erzzement (Heinemann, 2013).

A investigação em cimentos adequados para ambientes agressivos, o aumento de velocidade de construção, e substitutos de cimento Portland, levou ao desenvolvimento de novos tipos de cimento durante o século XX (Heinemann, 2013) . Em Portugal a primeira fábrica de cimento foi instalada em Alcântara, em 1866) (Varela e Vieira, 2005).

2.4.Ligantes aéreos

Consta-se que ao longo dos tempos a cal foi o ligante mais utilizado em argamassas para assentamento de alvenarias e para rebocos. No entanto, os ligantes hidráulicos foram-se desenvolvendo e a cal aérea foi caindo em desuso. Este ligante teria uma dificuldade acrescida devido à sua preparação, ao elevado tempo de endurecimento e a uma menor resistência, comparado a características de outros ligantes (Rodrigues, 2004).

As cais aéreas são produzidas a partir da rocha calcária pura ou de calcários magnesianos, com uma temperatura de calcinação entre 800 - 900°C, e podem classificar-se respetivamente de cais calcárias (CL) ou dolomíticas (DL) (Faria, 2012). Podem ainda dividir-se em cais vivas ou cais hidratadas. As cais vivas são constituídas por óxidos de cálcio e por óxidos de magnésio, já as cais hidratadas resultam da extinção das cais vivas. Estas últimas são produzidas sob a forma de pó seco, de pasta, ou de calda (Rodrigues, 2004).

As cais aéreas são cais constituídas principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio na qual endurecem lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico (Lea, 1970; Rodrigues, 2004).

A principal vantagem da introdução combinada de cal hidratada numa argamassa é a obtenção de melhor trabalhabilidade, pois confere facilidade de manuseamento e aplicação das argamassas e um melhor poder de sustentação dos agregados, diminuindo a segregação.

2.5.Ligantes hidráulicos

Os ligantes hidráulicos para aplicação em argamassas são pós finos que ao adicionar água formam uma pasta. Em determinadas condições são capazes de ganhar presa e endurecer devido apenas a reação química entre o pó e a água. Consideram-se hidráulicos porque além de endurecerem ao ar, podem atingir as suas características mesmo imersas em água. Estas características fazem deste tipo de ligante um material de construção atraente para estruturas hidráulicas (Varela e Vieira, 2005).

Vicat foi o primeiro a provar que as propriedades hidráulicas resultantes da queima de calcário puro com argilas se deveram aos novos compostos formados. Durante este processo, a cal viva, sílica, alumina e óxidos de ferro, produzidos durante a decomposição das matérias-primas, reagem para produzir os compostos hidráulicos. Dependendo da

percentagem de argilas presentes, tempo de queima e de temperatura, o grau de reação variará produzindo mais ou menos componentes hidráulicos (Charola e Henriques, 2000).

2.5.1. Cais hidráulicas

A cal hidráulica é o ligante que combina numa única substância, a presa hidráulica e a presa aérea. Este tipo de ligante pode classificar-se como cal hidráulica natural (NHL), cal hidráulica artificial (HL) ou cal formulada (FL) (Sequeira e Gonçalves, 2007; Velosa et al., 2013).

Este tipo de ligante é produzido a partir de calcários com o máximo de 20% argila, ou seja calcários margosos. A cal hidráulica natural (NHL) é constituída por compostos argilosos (SiO_2 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3). A cal hidráulica artificial (HL) é obtida pela mistura de hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio pré-determinados (Velosa, 2006).

No fabrico da cal hidráulica, formam-se vários compostos: C_2S ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), denominado de belite, e os compostos C_3A ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) e C_4AF (na forma de solução sólida variando entre C_2F ($2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$) e $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$ ($6\text{CaO}.\text{2Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$)), a temperaturas de cozedura a cerca de 1200°C (Velosa, 2006).

A presa das argamassas à base de cal e o seu endurecimento variam em função do grau de hidraulicidade da cal, que por sua vez está ligado ao teor de argila presente, definindo o índice de hidraulicidade. Quanto maior for a percentagem de argila, menor será o índice de hidraulicidade e menor será o tempo de presa (Rodrigues, 2004).

2.5.2. Cimentos

2.5.2.1. Cimento Portland

Os cimentos desenvolveram-se numa série de etapas, nesta evolução gradual alguns cimentos surgiram ao mesmo tempo com um considerável grau de importância, mas agora caíram parcialmente ou totalmente em desuso. Os cimentos naturais são o melhor exemplo deste grupo. As novas variedades de cimento continuam em crescimento devido ao desaparecimento dos antigos produtos. Muitos destes cimentos são utilizados apenas para

determinadas finalidades, pelo que correspondem a uma pequena fração comparada com o comum cimento Portland, que ainda representa a maioria da produção mundial (Lea, 1970).

Os princípios básicos para a produção de cimento Portland não mudaram desde a patente de Aspdin em 1824 (Heinemann, 2013). Os dois principais constituintes do cimento Portland são materiais calcários margosos ou a mistura de cal e argila, em que a componente argilosa pode variar entre os 20% e 40% (Velosa, 2006). As matérias-primas são moídas, misturadas e queimadas a temperaturas até cerca de 1450 °C, obtidas em grandes fornos rotativos. As matérias-primas reagem entre si originando novos compostos, que ao arrefecerem dão origem ao clínquer (Coutinho, 1997; Elsen et al., 2001; Heinemann, 2013; Varela e Vieira, 2005).

A mistura das matérias- primas é doseada, controlada e corrigida de modo que, depois de perder a água e o dióxido de carbono, por ação da temperatura atingida no forno, tenha uma composição dentro dos limites que se apresentam (Coutinho, 1997).

CaO – 60 a 68%

SiO₂ – 17 a 25%

Al₂O₃ – 2 a 9%

Fe₂O₃ – 0,5 a 6%

À saída do forno o clínquer deve ser arrefecido rapidamente, pois o silicato tricálcico (alite) é instável a temperaturas inferiores a 1250 °C. No final o cimento resulta da moagem fina de vários componentes, sendo o componente maioritário o clínquer, juntando-se gesso com a finalidade de regular o tempo de presa, e aditivos (cinzas volantes, escórias de alto forno, folhas de calcário, etc.) (Varela e Vieira, 2005). Este gesso dará origem ao cimento CEM em que o teor de hidróxido de cálcio e sílica reativos deverá ser superior a 50% (Velosa, 2006).

O cimento Portland é, sem dúvida, o mais importante na categoria dos ligantes hidráulicos, para além da hidraulicidade, está-lhe associado outra característica, o seu poder aglomerante, que se manifesta quando misturado com agregados, tornando possível o fabrico de argamassas e betões (Coutinho, 1997).

A ação das altas temperaturas sobre as componentes da matéria-prima leva a formação de novos compostos que constituem o cimento, tais como: silicato tricálcico C₃S (alite), silicato dicálcico C₂S (belite), aluminato tricálcico C₃A e ferroaluminato tetracálcico C₄AF. (Coutinho, 1997; Velosa, 2006)

A Norma Europeia EN 197-1 caracteriza vários tipos de cimentos, CEM I (cimento Portland), CEM II (Portland composto), podendo se decompor em cimento Portland de escórias, pozolânico e de cinzas volantes, CEM III (alto forno) e CEM IV (pozolânico) (Vicat, s.d.).

2.5.2.2. Cimento Natural

O cimento natural patenteado por James Parker em 1796, marcou um curto mas dinâmico período da construção na maioria das cidades europeias no final do século XIX e início do século XX (Bayer, et al. 2013; Pintér, et al. 2013), como se observa na Figura 1. Terá sido nesta época o principal material a oferecer uma solução económica e durável para a decoração de fachadas (Rocare, 2010; Wilk e Kozło, 2013).

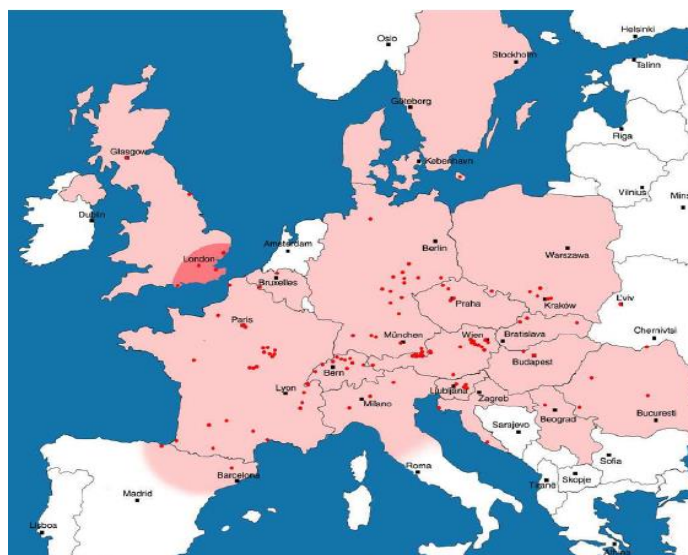


Figura 1- Produção e distribuição de cimento natural em alguns países da Europa (Rocare, 2010).

Os cimentos naturais são ligantes naturais altamente hidráulicos, produzidos a partir de margas, ou seja, pedras calcárias contendo argila. Esta combinação única de matéria calcária e argilosa necessita apenas da queima abaixo da temperatura de sinterização (800-1200°C), e da moagem das pedras calcinadas para produzir um ligante de notável resistência e durabilidade (Hughes et al., 2010; Pintér et al., 2013; Rocare, 2010).

Os cimentos naturais encontram-se entre as cais hidráulicas e cimentos Portland (Hughes et al., 2002). Estes diferem de cais hidráulicas na medida em que não contêm cal livre e, portanto, não necessitam de hidratação antes da moagem. No entanto, diferem dos cimentos Portland devido à composição química resultante da baixa temperatura de sinterização.

Em particular, as argamassas constituídas com cimento natural, apesar de obterem presa rapidamente, o aumento da força é relativamente lento, mas depois de vários meses, os valores de resistência à compressão são semelhantes, ou mesmo superiores, aos cimentos Portland (Rocare, 2010).

Capítulo 3

EDIFÍCIOS DO INÍCIO DO SÉCULO XX

3. EDIFÍCIOS INÍCIO DO SÉCULO XX

O património edificado assume-se como meio de transmissão de cultura e história sendo representativo de épocas e locais diferentes, significando por isso conhecimentos, métodos e materiais construtivos distintos.

Neste capítulo será abordado o contexto histórico e a identificação do património edificado entre o final do século XIX e o início do século XX em Portugal. Conjuntamente serão introduzidos os edifícios em estudo com o respetivo enquadramento histórico. Estes casos em análise contribuem para o estudo de argamassas de revestimentos exteriores de três edifícios pertencentes a esta época, evidenciando maior interesse na caracterização de argamassas antigas e a obtenção de informação acerca da história do monumento e sobre as tecnologias construtivas empregues.

3.1. Património edificado em Portugal

A segunda metade do século XIX correspondeu a um acelerado processo de urbanização. A industrialização portuguesa foi tardia e principalmente centrada em duas grandes cidades, Lisboa e Porto, com uma população global, correspondente a cerca de metade da população urbana do país (Teixeira, 1993). Estas cidades dominaram a hierarquia urbana sofrendo por isso, um maior impacto no desenvolvimento urbano e consequentemente num maior número de edifícios antigos que atualmente são património nacional.

José Marques da Silva foi o arquiteto que moldou a fisionomia do Porto no início do século XX, a sua primeira obra de grande significado urbano referente a esta época foi a Estação de São Bento (1896-1916). Esta assinala de um modo monumental a reconfiguração urbana despoletada pela chegada do caminho-de-ferro ao centro da cidade (Silva, s.d.).

Na sequência natural da construção da Estação de São Bento, como arquiteto municipal nesta época, construiu várias outras obras no centro da cidade. Como a conclusão do Palácio do Conde de Vizela (1920-1923), o Edifício das Quatro Estações (1905), os Armazéns Nascimento (1914-1927), mais tarde a instalação do café Palladium nos anos 70 e o Teatro Nacional de São João (1910-1920). Este último será relatado em pormenor de seguida, visto ser um caso de estudo da presente dissertação (Silva, s.d.). Ainda no Porto tem-se como referência desta época o Palácio da Bolsa (1842), considerado um dos mais belos edifícios

desta cidade contendo um dos salões de visita onde se têm desenrolado os marcantes acontecimentos sociais, políticos e culturais ligados à vida citadina (Martins, s.d.).

Com a grande implementação nos centros urbanos, encontra-se em Lisboa um vasto número de imóveis desta corrente. Destaca-se a Garagem Auto-Palace, com um projeto de 1906 assinado por Vieillard & Touzet, realizado para a Sociedade Portuguesa de Automóveis. O Palacete de Saldanha, edifício eclético projetado pelo arquiteto Norte Júnior em 1912 que recebe menção honrosa do Prémio Valmor nesse mesmo ano. O Hotel avenida Palace, na qual foi construído entre 1890 e 1892 pela Real Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses para servir de apoio à Estação Ferroviária do Rossio (IGESPAR, s.d.).

3.2. Casos de estudo

3.2.1. Teatro Nacional São João

Denominado originalmente como Real Teatro de São João, em homenagem ao então príncipe regente e futuro D. João VI (1767-1830), a sua primitiva edificação decorreu entre 1796 e 1798. O projeto foi elaborado pelo arquiteto e cenógrafo italiano do Teatro de S. Carlos, Vicente Mazzoneschi com intervenção pontual do pintor António de Domingos Sequeira.

Em 11 de Abril de 1908 um violento incêndio destruiu completamente o edifício, surgindo posteriormente uma comissão para iniciar a reconstrução do teatro, com início em 1911, com o projeto de Marques da Silva. Influenciado pelo restauro do *Théâtre d'Amiens*, introduziu linhas arquitetónicas e uma dramática decorativa bastante aproximada às de outras obras da sua autoria, como a "Estação de S. Bento" (Silva, s.d.).

Para os elementos estruturais Marques da Silva escolheu betão, tendo escolhido o mesmo material para a decoração das fachadas exteriores. As fachadas são elaboradas com ornamentos de diversos tamanhos e formas, desde figuras humanas a arranjos florais. Estas foram construídas em torno de uma armação de aço, que serviria de base às várias formas (Velosa, et al. 2013). Diogo de Macedo e Sousa Caldas terão sido os responsáveis pela elaboração das quatro figuras alegóricas colocadas no friso do entablamento, que representam a Bondade, a Dor, o Ódio e o Amor (Martins, s.d; Sereno e Santos, 1994).

O Teatro foi inaugurado dois anos depois de ter sido terminado, a 7 de Março de 1920, sendo em 1992 adquirido pelo estado português. A partir da década de trinta, o edifício serviu para exposições cinematográficas, sofrendo no entanto algumas intervenções. Em 1992 terão sido realizadas obras de segurança e de instalações de apoio ao público. No ano seguinte realizaram-se obras, desde remodelação dos camarins, ao palco, incluindo instalações sanitárias. Em 1994, decorreu a consolidação e restauro integral das fachadas do edifício; efetuou-se a recuperação de toda a decoração escultórica e um tratamento nos panos lisos em argamassa pigmentada; nova caixilharia de madeira e ferro. Por fim em 1995, foi reabilitado o seu interior pelo IPPAR, com projeto assinado pelo arquiteto João Carreira. Em 2012, o teatro foi reclassificado como monumento nacional (Martins, s.d.; Sereno e Santos, 1994). Figura 2.



Figura 2 – Teatro Nacional São João (IGESPAR, s.d)

3.2.2. Mercado do Bolhão

As origens do Mercado do Bolhão remontam à primeira metade do século XIX, quando a Câmara do Porto decidiu construir uma praça em terrenos adquiridos. Nesse local existia um extenso lameiro, atravessado por um regato que ali formava uma bolha de água, dando origem ao nome 'Bolhão' (Martins, s.d.; Sereno, 1996).

O espaço onde foi edificado o atual mercado era já considerado um foco de comércio. Tal facto explica-se pela existência de uma fábrica de estampania e outra de fundição nas redondezas. O edifício integrado na baixa do Porto começou a ser construído em 1851, com o objetivo de concentrar todo o comércio nesta parte da cidade.

Em 1910 surgiu um anteprojeto do arquiteto Casimiro Barbosa, que previa um edifício com duas alas, tendo a Rua Sá da Bandeira como eixo central. Este projeto foi abandonado por razões económicas, mas na altura, a praça já havia sido melhorada com a construção de rampas de acesso e barracas de madeira no corredor central do mercado.(Braga, 2009)

Posteriormente, em 1914 o mercado do Bolhão assume o traço atual. Coube ao arquiteto Correia da Silva executar o projeto do edifício que envolve a praça do mercado já existente, conseguindo conferir-lhe monumentalidade. Trata-se de um edifício caracterizado por uma arquitetura neoclássica, com uma estrutura constituída por dois pisos, em que na altura terá sido uma obra de vanguarda devido a estrutura ser composta por betão armado e estruturas metálicas (Braga, 2009; Martins, s.d.).

Exteriormente, o mercado divide-se num grande número de estabelecimentos, voltados para as quatro ruas que o delimitam: Fernandes Tomás, a norte, Alexandre Braga, a este, Formosa, a sul, e Sá da Bandeira a oeste. (Braga, 2009; Martins, s.d.; Sereno, 1996)

Em meados de 1984 foi detetada a necessidade de uma reabilitação profunda, quando os serviços municipais identificaram patologias construtivas graves nos pavimentos do mercado. Na sequência das obras que se seguiram, os técnicos responsáveis concluíram que era necessária uma intervenção de consolidação e reabilitação do mercado, tendo a autarquia decidido abrir um concurso, em 1992, que veio a ser ganho por um projeto apresentado pelo arquiteto Joaquim Massena, que ficou a aguardar a execução.(Braga, 2009; Sereno, 1996)

Em 1994 o projeto foi retomado para incluir uma estação do Metro do Porto, culminando dois anos mais tarde com a adjudicação do desenvolvimento do projeto. Só em 1998, foi apresentado um projeto que foi aprovado por unanimidade pela Câmara do Porto e por todos os restantes organismos envolvidos, entre os quais o IPPAR (atual IGESPAR). Apesar disso, o projeto nunca foi executado e a Câmara do Porto começou progressivamente a afastar-se desta opção, que chegou a ser considerada obsoleta e economicamente inviável.

Em 1997, foi pedida a Classificação do Mercado do Bolhão, enquanto edifício Patrimonial (Braga, 2009; Sereno, 1996).

Atualmente, por questões de políticas camarárias, de movimentos partidários e de interesses económicos, este mercado encontra-se num estado frágil e precário necessitando de uma intervenção. (Braga, 2009; Martins, n.d.-c)



Figura 3 – Mercado Bolhão (IGESPAR, s.d.)

3.2.3. Palácio Oscarshall

O palácio de verão de Oscarshall está localizado na península de Bygdøy, em Oslo na Noruega. O palácio foi construído entre 1847 e 1852 pelo arquiteto dinamarquês Johan Henrik Nebelong para o Rei Óscar I. Oscarshall foi vendido pelo rei Carl IV ao estado norueguês em 1863, e tem estado à disposição dos reis noruegueses desde então. O interior foi totalmente construída por artistas e artesãos noruegueses (Oscarshall,s.d.). Tradicionalmente os edifícios eram construídos com argamassa de cal, no entanto este terá sido o primeiro edifício norueguês a usar cimento Portland para revestimentos. O palácio desde a sua origem teve problemas, ao longo dos 150 anos foi continuamente reparado e redesenhado de forma a ultrapassar as suas falhas (Moe et al., 2010).

Estas reparações incluíram o preenchimento de fendas usando argamassas existentes na altura para impedir a entrada de água, remoção de fungos e madeira infestada, instalação de ventilação interior no edifício e reparações no revestimento com argamassas de cal/cimento. Devido a queda de revestimentos e alvenaria da torre frontal o edifício foi fechado em 1908.

As causas destas contínuas reparações terão sido provocados pelo desenho inicial do palácio e devido à existência de vários terraços sem drenagem, à ausência de ventilação interior e às esporádicas reparações no edifício escolhendo uma má qualidade de material nomeadamente do cimento Portland (Moe et al., 2010).

Depois de ser restaurado na década de 1990, o palácio foi aberto ao público como museu. Entre 2005 e 2009 o palácio sofreu uma restauração completa de interiores e exteriores do edifício principal, sendo que também foram abrangidos os prédios auxiliares. O principal objetivo foi recriar o edificado original do arquiteto Nebelong, tanto quanto possível. O trabalho de restauração foi realizado com base em investigações preliminares minuciosas, vastos testes de cor dos interiores e vários tipos de tinta em diferentes partes do edifício. Assim, o palácio recuperou sua cor branca original depois de ter sido pintado rosa claro após a Segunda Guerra Mundial. As partes do reboco original, que estavam em boas condições foram preservadas (Moe et al., 2010; Oscarshall, s.d.).

Outro dos principais objetivos foi tornar Oscarshall mais acessível do que anteriormente. O palácio é utilizado como um local para eventos oficiais, bem como entretenimento e concertos. Além disso, o edifício está melhor equipado para receber o público e as visitas guiadas durante as temporadas de verão. Assim, a tradição mantém-se desde o tempo do Rei Óscar I, que abriu Oscarshall para o público e fez do palácio um destino popular não só para os habitantes de Christiania (atual Oslo), bem como os visitantes, essencialmente de verão (Oscarshall, s.d.).



Figura 4 – Palácio Oscarshall (Oscarshall, s.d.)

Capítulo 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental apresentado neste capítulo encontra-se dividido em duas fases distintas. Na primeira fase apresentam-se amostras provenientes dos edifícios antigos em estudo, assim como os ensaios e procedimentos que serviram de base à caracterização destas argamassas. Na segunda fase apresentam-se as formulações das argamassas de substituição, as suas composições bem como o seu processo de execução. Analogamente à primeira fase, expõem-se os ensaios necessários a avaliação do seu comportamento.

4.1. Caracterização das argamassas antigas

4.1.1. Amostragem

Este estudo envolve a recolha de várias amostras provenientes de revestimentos exteriores de três edifícios, o Teatro Nacional São João, o Mercado do Bolhão e o Palácio Oscarshall.

Estes monumentos foram selecionados tendo em consideração o seu enquadramento histórico, em virtude de serem representativos da mesma época e edificados entre o final do século XIX e o início do século XX. Contudo, esta amostragem incidiu sobre o Teatro Nacional São João em que foram retiradas argamassas de diferentes fachadas e alturas do solo. Visando sempre o menor dano possível, tendo-se optado por recolher revestimentos já em fase de destacamento.

Neste contexto, uma vez que estes edifícios no passado foram alvo de algumas intervenções de reabilitação nas suas fachadas, tornou-se um ponto de interesse, a recolha de exemplares onde são visíveis as várias intervenções sofridas.

Nas Figura 5, 6 e 7 apresentam-se os locais de origem das amostras provenientes do Teatro Nacional São João. As argamassas retiradas do alçado poente têm origem em vários elementos representativos da fachada, como ornamentos decorativos, cornijas e máscaras de figuras tanto feminina como masculina.

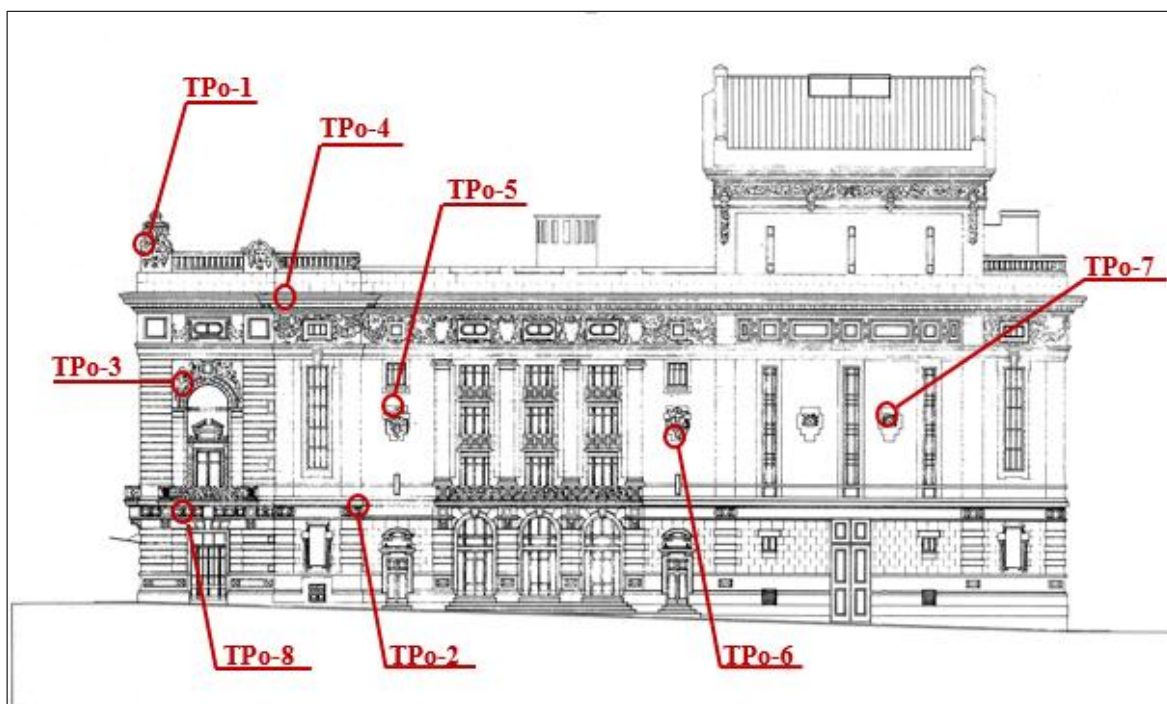


Figura 5 - Locais de recolha de amostras da fachada poente - TNSJ

As amostras retiradas da fachada nascente do TNSJ têm origem em elementos pertencentes ao piso 1 e 2 provenientes de ornamentos decorativos, como se pode observar na Figura 6.

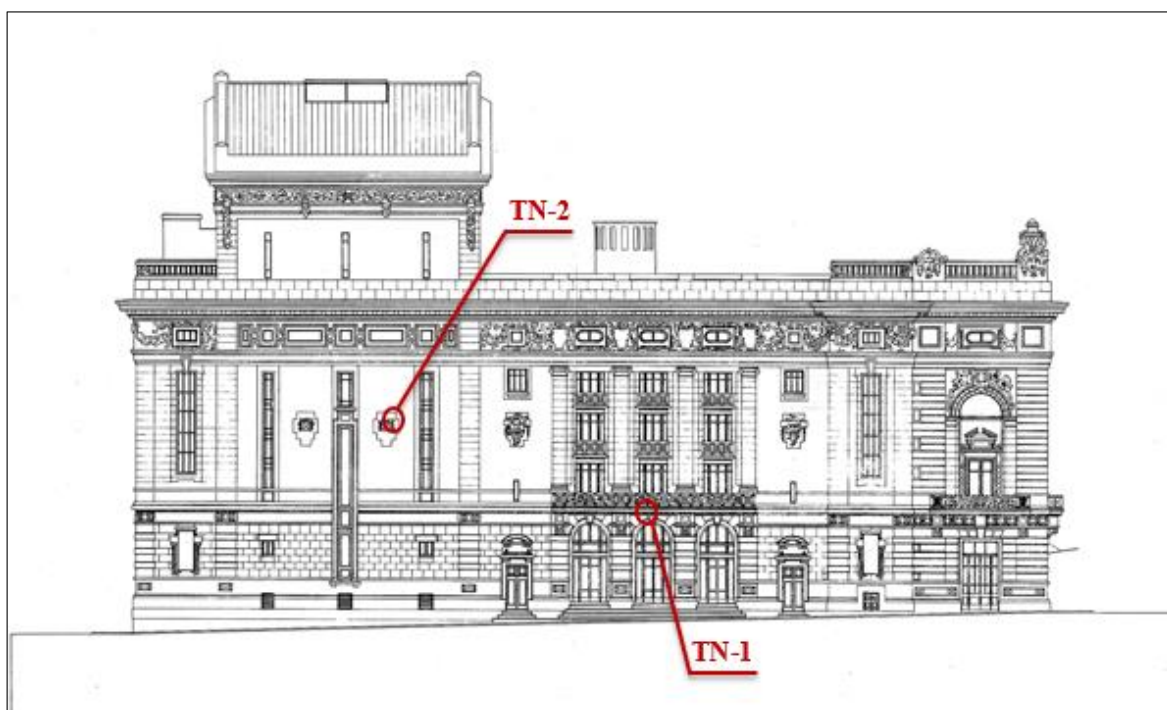


Figura 6 - Locais de recolha de amostras da fachada nascente - TNSJ

As amostras provenientes do alçado principal do TNSJ foram recolhidas de elementos como argamassas de reboco, de uma mísula e de uma figura decorativa, como se pode observar na Figura 7.

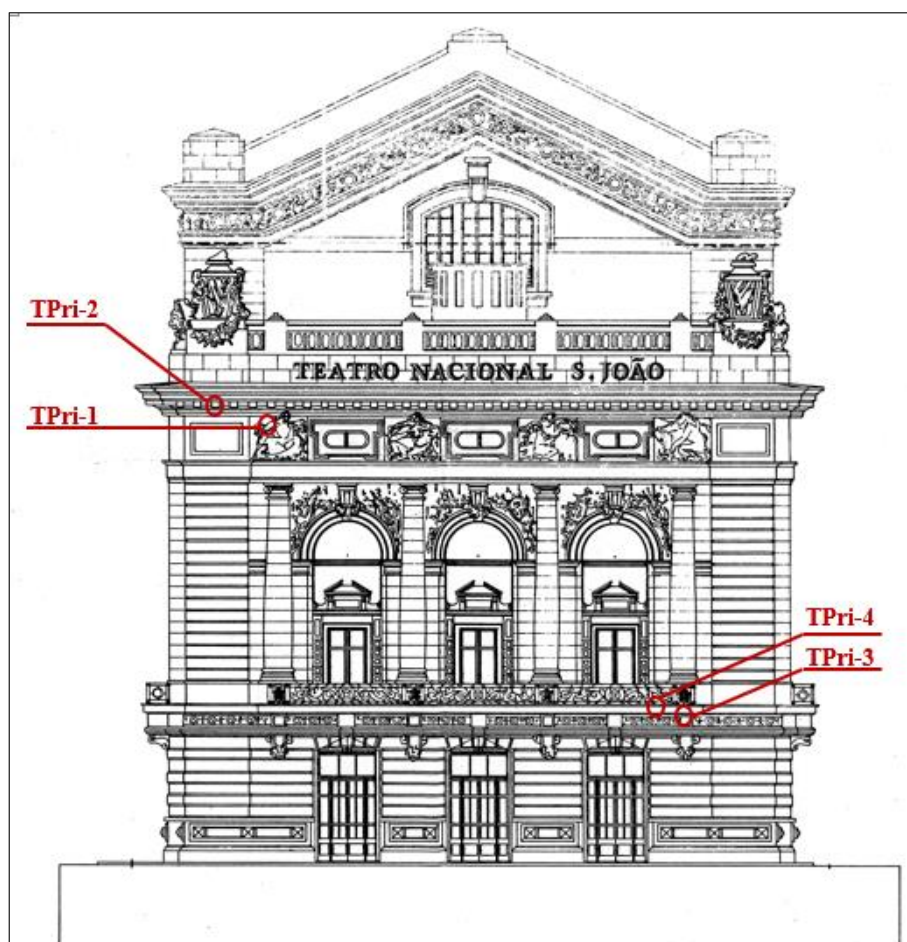













Figura 7 - Locais de recolha de amostras da fachada principal - TNSJ




As restantes amostras, advêm da queda de elementos de argamassas que foram resgatadas, e por isso de local desconhecido, catalogando-se de T-1 a T-10.

Na Tabela 1 apresenta-se a listagem das amostras recolhidas do edifício, com as respetivas designações, descrições e registo fotográfico dos locais de extração.

Tabela 1- Listagem de amostras recolhidas - TNSJ

Teatro Nacional São João			
Fachada	Designação	Descrição	Registo fotográfico
Poente	TPo-1	Amostra retirada de máscara, nariz da figura existente no canto com a fachada Norte	
	TPo-2	Amostra retirada de uma cornija ao nível mais baixo do edifício	
	TPo-3	Amostra retirada de ornamento decorativo pertencente ao arco sobre a varanda	
	TPo-4	Amostra retirada de uma cornija ao nível superior do edifício	
	TPo-5	Amostra retirada de uma máscara (figura feminina)	

Poente	TPo-6	Amostra retirada de uma máscara (figura masculina)	
	TPo-7	Amostra retirada de ornamento com motivo floral	
	TPo-8	Amostra retirada de ornamento decorativo junto à varanda	
Principal	TPri-1	Amostras retirada braço/ombro de figura lado esquerdo	
	TPri-2	Amostra retirada mísula ao nível superior edifício	
	TPri-3	Amostra retirada de reboco parte inferior do edifício	

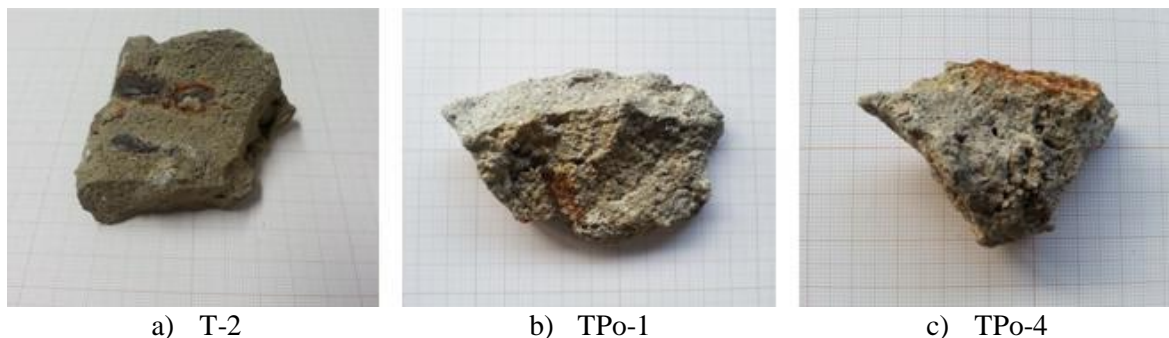
Principal	TPri-4	Amostra retirada de reboco parte inferior do edifício	
Nascente	TN-1	Amostras retirada de ornamento floral, zona inferior à varanda, piso 1	
	TN-2	Amostra retirada de ornamento floral, piso 2	

Na recolha das amostras constata-se que o Teatro Nacional São João apresenta ao nível dos revestimentos exteriores da fachada, bastantes armaduras interiores, sugerindo assim a utilização de argamassas armadas por todo o edifício, incluindo elementos decorativos e ornamentos.

Verificou-se que as argamassas de elementos salientes construídos em argamassa armada apresentam fissuras, fraturas e destacamentos. Neste contexto, algumas das amostras apresentaram maior facilidade na sua remoção pois destacaram-se pela interfase entre a argamassa e a armadura.

Considerando esta condição, depreende-se que devido à permeabilidade das argamassas a oxidação das armaduras é evidente, contribuindo assim para a degradação destas.

Na Figura 8 apresentam-se algumas amostras onde é visível a oxidação das armaduras em contacto com as argamassas.



a) T-2 b) TPo-1 c) TPo-4

Figura 8 - Amostras com apresentação de oxidação armadura

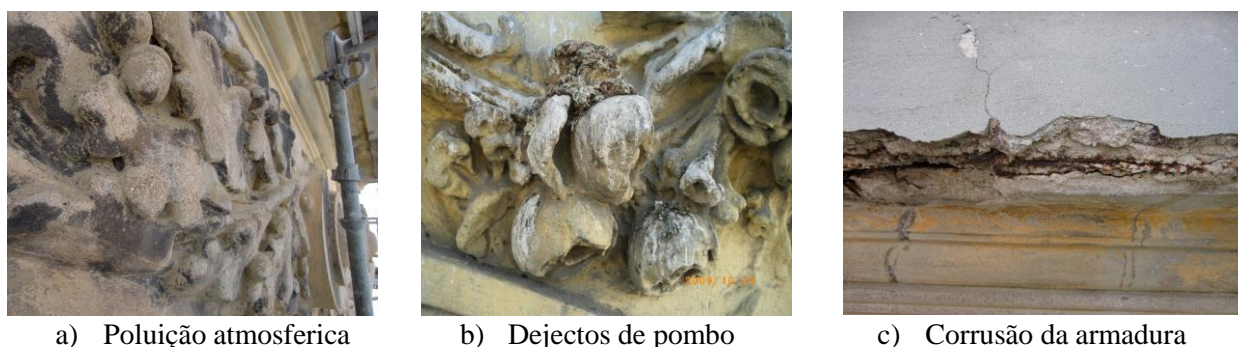
Destacam-se ainda as amostras em que são visíveis as diferentes colorações e camadas que compõem as argamassas. Podendo-se depreender a existência de intervenções ao nível de reabilitação da fachada em várias fases de vida útil do edifício, como se pode observar na Figura 9.



a) T-5 b) T-5 c) T-10

Figura 9 - Amostras compostas com várias camadas de argamassa

São visíveis nas fachadas do Teatro Nacional São João possíveis causas para a deterioração de argamassas exteriores. Identificou-se a presença de agentes de degradação, como a poluição atmosférica, pois o edifício está inserido no centro da cidade. Observou-se a presença de dejetos provenientes das aves, provocando corrosão química e ainda a oxidação do ferro e consequente aumento de volume. Na Figura 10 apresenta-se o registo fotográfico da presença destes agentes.









a) Poluição atmosférica b) Dejectos de pombo c) Corrusão da armadura

Figura 10 - Causas da degradação das argamassas

Na Tabela 2 figuram as amostras provenientes do Mercado do Bolhão e do Palácio Oscarshall, assim como uma breve descrição e registo fotográfico. Evidencia-se que em ambas as amostras recolhidas do Mercado do Bolhão apresentam duas camadas distintas, uma camada de espessura inferior denominada por barramento e a outra camada denominada como argamassa.

Tabela 2 - Listagem de amostras recolhidas - Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall

	Designação	Descrição	Registo fotográfico	
Mercado do Bolhão	MB-1a/b	Amostra retirada da fachada, a- lado argamassa b- lado barramento		
	MB-2a/b	Amostra retirada da fachada, a- lado argamassa b- lado barramento		
Palácio Oscarshall	Osc	Amostra retirada da fachada do edifício		

4.1.2. Ensaios nas argamassas dos edifícios em estudo

De forma a obter uma caracterização o mais completa possível das amostras recolhidas dos edifícios em estudo, foram realizados diversos ensaios. Estes apresentam um carácter importante visto fornecerem informação relevante relativo ao enquadramento histórico de cada edifício.

São técnicas que permitem a distinção entre os materiais constituintes de cada argamassa, e que fornecem informação em termos percentuais de razão ligante/ agregado. A verificação da granulometria do agregado torna-se também um fator de interesse pois influencia a porosidade das amostras, e como tal, o comportamento das argamassas (Velosa, 2006).

A determinação quantitativa da composição química das amostras, assim como a informação qualitativa dos minerais cristalinos existentes, concedem também dados importantes às suas características, complementando outros ensaios (Velosa, 2006). Na Figura 11, representam-se em diagrama o conjunto de ensaios realizados.

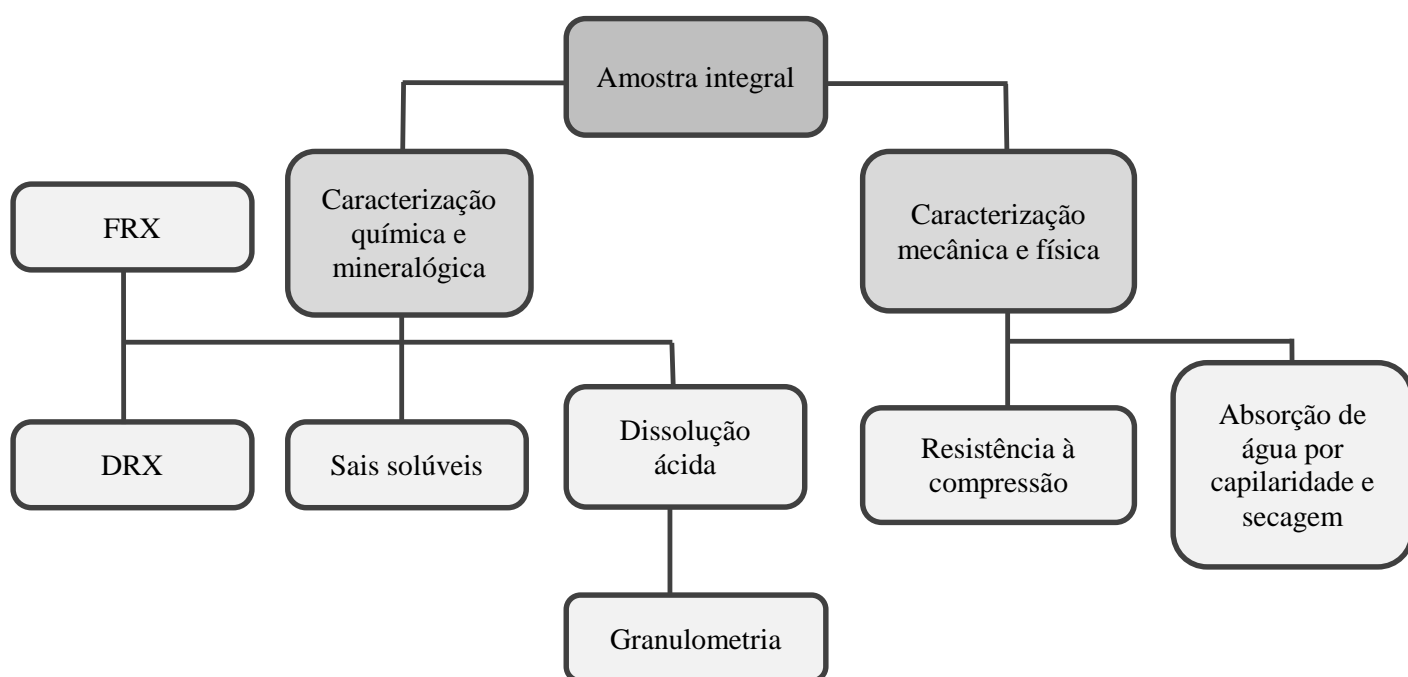


Figura 11- Diagrama de ensaios realizados nas amostras recolhidas

4.1.2.1. Determinação da relação agregado/ligante por dissolução ácida

Esta técnica permite a caracterização das argamassas antigas recolhidas de forma a estimar a relação entre o ligante e os agregados de natureza siliciosa. Este método baseia-se no ataque com ácido clorídrico que provoca a dissolução de carbonatos (calcite, aragonite, dolomite, magnesite) existentes nas amostras, permitindo assim o cálculo da percentagem de resíduo insolúvel (Velosa, 2006). Deste modo, os agregados são obtidos a partir do resíduo insolúvel e o ligante é definido a partir do material que foi solubilizado no ácido. Esta técnica pode no

entanto ser falseada caso haja presença de agregados não siliciosos, que também se dissolvem no ácido.

Este método foi efetuado segundo a norma ASTM-C 25-98. Foram previamente moídas pelo menos 50 gr de cada amostra e colocadas num gobelé, onde se juntou pouco a pouco, 100ml de ácido clorídrico diluído (1:1) mantendo uma efervescência controlada, como se observa na Figura 12 a) e b). Ferveu-se durante aproximadamente 10 minutos, e deixou-se repousar. Por fim, filtrou-se o resíduo e colocou-se na estufa para secar e atingir o peso constante, Figura 12 c).

As frações de ligante e agregados foram calculadas pelas equações 4.1 e 4.2.

$$\% \text{ Agregados} = \frac{m_{\text{resíduo}} (g)}{m_{\text{amostra}} (g)} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\% \text{ Ligante} = 100 - \% \text{ Resíduo insolúvel} \quad (4.2)$$

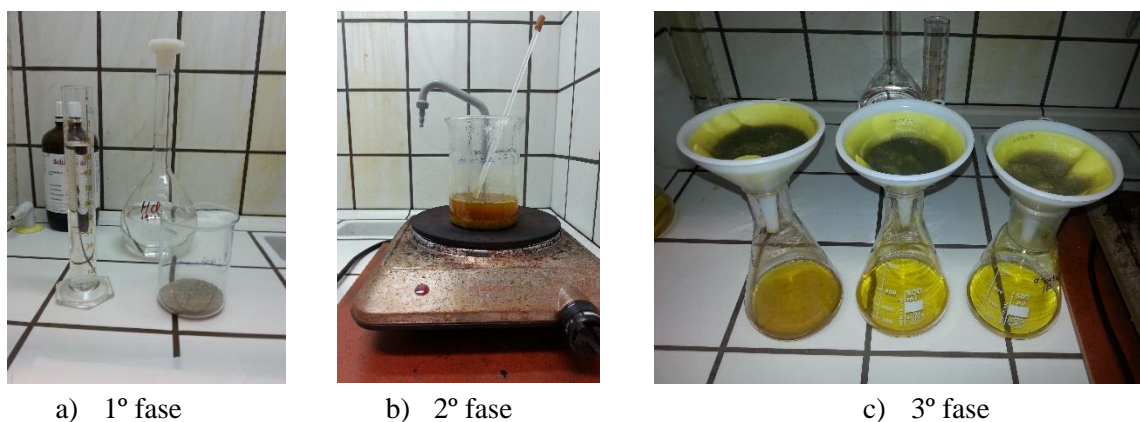


Figura 12 - Registo fotográfico ensaio de dissolução ácida

4.1.2.2. Granulometria

A distribuição das partículas de um dado agregado segundo as suas dimensões designa-se por granulometria e tem uma enorme influencia sobre as propriedades das argamassas, particularmente no que se refere à compacidade e à trabalhabilidade.

O método de estudo da granulometria decorreu segundo os pressupostos presentes na norma Europeia EN 1015 – 1, com auxílio de um agitador de peneiros, durante 10 minutos com intensidade de vibração controlada.

Este ensaio iniciou-se com o resíduo seco proveniente da dissolução ácida, tomado como agregado. Após lavagem do resíduo com auxílio do peneiro de 0,063 mm, foi colocado novamente na estufa a cerca de $100^{\circ}\text{C} \pm 10$ e registado o seu peso. Finalmente para a peneiração a seco do agregado usou-se uma série de peneiros de abertura normalizada, e pesaram-se as parcelas do agregado de forma a permitir o cálculo das respetivas frações granulométricas. O conjunto de peneiros utilizados na análise pertencem à serie I.S.O 565 com aberturas nominais de malha de 0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1,00; 2,00; 4,00 [mm].

Para se definir a curva granulométrica, é essencial efetuar o cálculo da percentagem de material acumulado passado em cada um dos peneiros, bastando para tal somar a percentagem do material retido no peneiro em causa às percentagens registadas em todos os peneiros de malha inferior.

4.1.2.3. Composição química – Fluorescência de Raio X (FRX)

A Fluorescência de Raios X permite determinar a composição química e a percentagem de elementos químicos presentes nas amostras. É através da excitação das amostras por um feixe de raios X incidido sobre estas que irá possibilitar essa identificação.

Para preparar estas amostras foi necessário moer as mesmas de modo a obter pelo menos 12g de fração fina passada pelo peneiro $<75\mu\text{m}$ para análise no Espectrómetro de Florescência Philips PW 1400 X-Ray.

4.1.2.4. Composição mineralógica – Difractometria de Raio X (DRX)

Este ensaio consiste na incidência de raios X e da sua difração pela amostra preparada, permitindo obter um difractograma onde se podem ler os registos pertencentes aos diversos compostos cristalinos existentes nas argamassas recolhidas. Permitindo assim, identificar o tipo de minerais presentes nas amostras e as suas fases cristalográficas. A análise destes difractogramas foi realizada recorrendo a uma base de dados ICDD.

Neste contexto, adotou-se um procedimento de preparação das amostras similar ao FRX, e usou-se para análise o Difractómetro de Raios-X Philips X-Pert Pró.

4.1.2.5. Resistência à compressão

A determinação das propriedades mecânicas de argamassas antigas torna-se um processo difícil devido à variabilidade da forma das amostras recolhidas. Para tal, foi necessário aplicar uma argamassa de confinamento, mais resistente e com forma regular, como se pode observar na Figura 13. A argamassa de confinamento foi executada com cimento e areia siliciosa com um traço de 1:3, com dimensões de 400 x 400 mm. Após a sua aplicação aguardou-se um período de 28 dias, para garantir o endurecimento da argamassa.

O ensaio de compressão decorreu segundo a norma NP EN 1015:11, utilizando a prensa eletromecânica Shimadzu modelo AG-IC 100kN aplicando uma célula de carga de 100KN a uma velocidade de 50N/seg. A carga foi aplicada de forma gradual e contínua levando a amostra até à rotura.

Deste modo, a tensão de rotura à compressão é dada pelo quociente entre a carga máxima e a área de secção transversal onde foi aplicada a força, expressa na equação 4.3.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ (N /mm}^2\text{)} \quad (4.3)$$

Onde,

F_c – Força de rotura (N)

A – área de secção comprimida (mm²)



Figura 13 - Amostras com argamassa de confinamento para ensaio de resistência à compressão

O estudo sobre o comportamento mecânico de argamassas antigas torna-se tecnicamente limitado, pois não é viável extrair dos edifícios em estudo amostras de grande dimensão. As amostras retiradas de edifícios antigos geralmente apresentam uma espessura inferior a 20mm (Drdácký et al,2008). Neste ensaio a espessura das amostras é um parâmetro fundamental.

Neste sentido, foram desenvolvidas técnicas, utilizando argamassas de confinamento e fatores de correção, visando melhorar o estudo sobre esta característica em argamassas recolhidas em edifícios antigos. Segundo Horký and Dohnálek o fator de correção depende principalmente do comprimento da aresta da base da amostra, da esbelteza ou da relação entre a altura e o comprimento da base da amostra e da força de compressão aplicada na argamassa. Surgem assim, vários fatores de correção propostos por Drdácký para várias composições de argamassas (Drdácký et al,2008). O coeficiente de correção que se segue, expressa a resistência mecânica em argamassas fracas de cal.

$$R_{cc} = F_c / (h/a)^{-1.9114} \quad (4.4)$$

Onde,

R_{cc} = resistência à compressão corrigida (N /mm²)

h = altura da amostra (mm)

a = área da seção comprimida (mm²)

Para argamassas de cal o expoente utilizado será -2,2076 e para argamassas constituídas por cal, metacaulino e cimento o expoente será -1,065.

4.1.2.6. Absorção da água por capilaridade

As argamassas de revestimentos exercem um papel fundamental na capacidade de impermeabilização, principalmente nos exteriores. Esta característica tem grande importância na definição da qualidade de uma argamassa, uma vez que a água absorvida por capilaridade vai contribuir para um mau desempenho da mesma, influenciando assim a sua durabilidade. A capilaridade entende-se como a capacidade que uma argamassa tem de

absorver água, de forma natural, sem se exercer pressão. Para o estudo desta movimentação de água pelos capilares das amostras é utilizado o coeficiente de capilaridade, expresso em $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$.

A realização do ensaio de absorção da água por capilaridade foi aplicado em algumas amostras de acordo com os procedimentos definidos na norma EN 1015-18, adaptados às amostras existentes em estudo.

As argamassas foram colocadas numa estufa a 65 ± 5 °C durante 24 horas, e em seguida, foram colocadas no exsiccador para que arrefecessem até atingirem a temperatura ambiente. Com o auxílio de um papel milimétrico foi medida a área de cada amostra, pois a quantidade de absorção de água depende da área da amostra em contacto com a água e do tempo.

O procedimento deste ensaio implica a colocação de um geotêxtil dentro de um tabuleiro com água, garantindo que durante todo o ensaio exista cerca de 2mm de água, como se pode observar na Figura 14. Com finalidade de medir a evolução da absorção da água das amostras ao longo do tempo, fez-se o registo da sua massa até atingirem o peso inicial.

Com os valores registados foi possível obter o coeficiente de capilaridade, de acordo com uma regressão linear obtida com os valores do tempo ($\text{min}^{1/2}$) e da absorção de água (kg/m^2) no período em que se verifica um aumento do peso da amostra.

Após determinação da absorção da água e as amostras atingirem a sua saturação, foi igualmente medida a secagem do conjunto, até atingirem o peso constante.



Figura 14 - Ensaio de absorção da água por capilaridade

4.1.2.7. Índice de secagem

Assim como a absorção da água é uma característica essencial na avaliação do desempenho de uma argamassa face à água, também o estudo da capacidade de secagem de um revestimento exterior é pertinente.

Numa argamassa pretende-se que a absorção da água seja lenta, mas que a secagem seja rápida, de modo a que a água não permaneça no seu interior causando a sua degradação. Neste contexto, o índice de secagem permite assim avaliar a capacidade de eliminação da água contida no seu interior.

Na prática, a secagem é executada após as amostras atingirem saturação por capilaridade. Para avaliação do índice de secagem as amostras são recolhidas do tabuleiro, onde decorre o ensaio de absorção da água por capilaridade, e são coladas num tabuleiro seco. Permitindo assim, registar os valores de massa de cada amostra ao longo do tempo durante o processo de secagem.

A curva de secagem das amostras permite determinar o índice de secagem (I_s) através da equação 4.5.

$$I_s = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(w_i) \times dt}{w_0 \times t_f} \quad (4.5)$$

Onde,

t_0 - início do ensaio;

t_f – tempo final do ensaio;

w_0 - quantidade de água inicial, expressa em percentagem relativamente à massa seca [%];

$f(w_i)$ - quantidade de água no interior do provete em função do tempo, expressa em percentagem relativamente à massa seca.

4.1.2.8. Comportamento aos sais

A cristalização de sais solúveis é um dos principais mecanismos de degradação, estes podem ser particularmente danosos para argamassas e suportes (Costa, 2013; Velosa, 2006). Neste

contexto, torna-se um parâmetro de interesse a estudar dado que as argamassas recolhidas pertencem a edifícios antigos de interesse histórico.

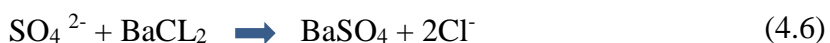
Os sais solúveis podem ter origem em diversas fontes, tais como, no tipo de solo presente (solos salinos e humidade no terreno com sais solúveis), nos materiais empregues na construção (sais presentes tanto na água como na areia constituinte das argamassas), como na atmosfera poluída (Costa, 2013).

Os sulfatos, cloretos e os nitratos/nitritos são sais que podem originar degradação, e como consequência serão o tipo de sais que servirão de guia para avaliar este comportamento relativamente às argamassas recolhidas. Neste ensaio assumiu-se o ataque com ácidos conhecidos de forma a verificar a formação de precipitados. (Figura 15 a) e Figura 16)

Primeiramente as amostras devem ser reduzidas a pó fino e homogéneo, com uma granulometria obtida após moagem e passagem no peneiro 100 mesh ASTM de 150 µm. Foi pesado 10g por amostra e misturado 100 ml de água destilada, que seguidamente foram postos agitar durante 60 minutos. Posteriormente filtrou-se as amostras em suspensão (Figura 15b)) e recolheu-se os filtrados em frascos limpos e secos de modo analisar a água que poderia conter os sais solúveis. Os ensaios realizados para cada tipo sal foram os seguintes:

- Ensaio aos sulfatos, SO_4

Após colocar um pouco da solução extraída num tubo de ensaio acidificou-se com duas gotas de ácido clorídrico (HCL, 2N) para que em seguida o cloreto de bário (BaCl_2) possa reagir com os eventuais sulfatos presentes. Adicionam-se assim duas gotas de cloreto de bário (10%) e agitou-se suavemente. A formação de um precipitado de cor branca, sulfato de bário (BaSO_4) insolúvel em ácido nítrico diluído indicará a presença de sulfatos.



- Ensaio aos cloretos, Cl

De forma análoga a análise de sulfatos, após colocar a solução extraída num tubo de ensaio, juntou-se duas gotas de ácido nítrico (HNO_3 , 2N) e duas gotas de solução de nitrato de prata

(AgNO₃, 0.1N). Neste ensaio a formação de um precipitado de consistência gelatinosa e de cor branco-azulada indicará a presença de cloretos.



- Ensaio aos nitritos, NO₂

Nesta preparação, para indicar a presença de nitritos foi necessário juntar a solução extraída duas gotas de ácido acético (CH₃COOH, 2N) e duas gotas do reagente de Griess-Ilosvay. A mudança de cor para a tonalidade rosada indicará a presença de nitritos.

- Ensaio aos nitratos, NO₃

Para efetuar esta análise parte-se da análise anterior de nitritos, se o resultado anterior der negativo, isto é, ausência de nitritos, adiciona-se uma pequena quantidade de zinco em pó ao tubo de ensaio usado na solução antecedente. O zinco na presença do ácido acético terá a finalidade de reduzir os nitritos proporcionando assim a reação com o reagente de Griess-Ilosvay. No entanto, se a análise de nitritos der positiva, irá juntar-se ácido sulfâmico ao zinco e ao reagente pois este irá eliminar os nitritos. Da mesma maneira, a mudança de cor para a tonalidade rosa indicará a presença de nitritos.



a) Reagentes utilizados



b) Filtração da solução com amostra

Figura 15 – Preparação do ensaio de comportamento a sais solúveis

Os resultados deste ensaio serão expressos qualitativamente através da maior ou menor ocorrência dos iões em análise, como podemos ver no quadro seguinte.

Tabela 3 - Avaliação qualitativa da presença iões de sais solúveis

-	Ausência de iões
±	Presença de iões no limite da perçetibilidade
+	Presença de iões
++	Presença de iões em quantidade apreciável
+++	Presença de iões como componente principal

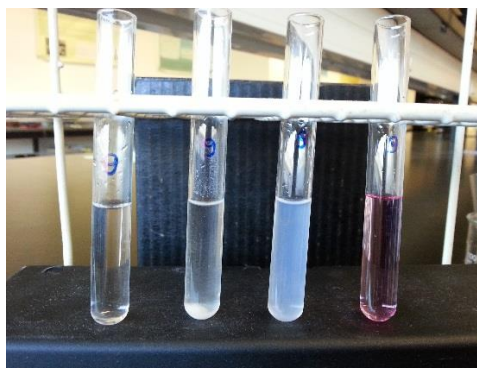
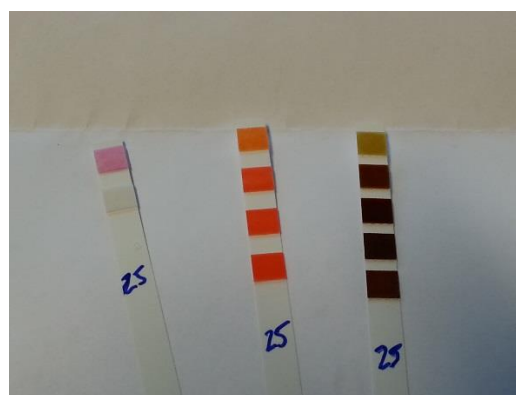


Figura 16 - Ensaio de comportamento aos sais realizado à amostra T-4

Para uma análise semi-quantitativa foram usados marcadores, onde é possível avaliar a quantidade de sais existentes a analisar, como sulfatos, cloretos, nitratos e nitritos que poderão estar presentes na solução extraída. Neste tipo de fitas, quando mergulhadas na solução em estudo são visíveis as mudanças de tonalidade nos marcadores. Cada tubo exhibe várias escalas de cor para posteriormente serem comparadas com os vários indicadores, Figura 17. A análise semi-quantitativa da presença de sais é apresentada em mg/l. O indicador dos sulfatos apresenta uma escala entre os 200 – 1600 mg/l, os cloretos uma escala entre os 500-3000 mg/l, os nitritos entre 1-80 mg/l e os nitratos uma escala entre 10-500 mg/l.



a) Escala semi-quantitativa dos indicadores colorimétricos



b) Indicadores colorimétricos

Figura 17 - Avaliação semi-quantitativa de iões de sais solúveis

4.2. Formulação e caracterização de argamassas de substituição

Neste subcapítulo pretende-se fundamentalmente o desenvolvimento e conceção de uma argamassa passível de ser compatível química, física e mecanicamente com as argamassas pertencentes ao património edificado antigo, nomeadamente os edifícios em estudo. Procura-se encontrar uma argamassa detentora de boas características ao nível da trabalhabilidade, particularmente por se tratar de uma argamassa de revestimento, e com um desempenho eficaz face aos requisitos estabelecidos para uma argamassa com esta função.

Neste contexto, expõem-se os métodos experimentais e respetivos procedimentos para a concretização destas argamassas. Apresentam-se as diversas formulações e matérias-primas utilizadas, assim como as condições de cura dos provetes.

4.2.1. Formulações

Para a realização das novas argamassas utilizou-se como matéria-prima: areia de rio siliciosa como agregado; cal hidráulica natural NHL 3,5 da SECIL, cimento natural Prompt Vicat, cimento Portland CEM I 42,5R e cal aérea H100 da Lusical como ligantes; e água.

A areia do rio utilizada encontrava-se seca, limpa e sem qualquer tipo de impurezas que pudessem afetar os resultados do trabalho. Contudo, antes do início da sua aplicação, realizou-se uma peneiração manual, utilizando o peneiro de 4 mm pertencente à serie (ISSO3310-2:1990), de forma a eliminar as partículas de maior dimensão. Posteriormente, foi obtida a curva granulometria deste agregado, como se pode ver na Figura 47.

Os restantes constituintes não sofreram qualquer reparação, tendo-se utilizado os ligantes diretamente dos sacos em que são comercializados.

As argamassas foram preparadas com base nos ligantes hidráulicos assim como na mistura de ligantes hidráulicos e cal aérea. Desta forma variou-se o tipo de ligante bem como as suas proporções. Diversificou-se a razão ligante/agregado das argamassas, e foram utilizados traços volumétricos como 1:2 e 1:3, entre outros. Na Tabela 4 figuram as formulações efetuadas bem como as respetivas designações.

Tabela 4 - Traços volumétricos das argamassas realizadas e respetivas designações

Designação	Traço volumétrico		Água (140mm)
NHL_1,2	1:2	NHL3,5 ; areia	15%
NHL_Ca	1:1:4	NHL 3,5; H100; Areia	15%
V_1,2	1:2	Vicat; areia	23%
V_1,3	1:3	Vicat; areia	21%
V_Ca1	1,5:0,5:4	Vicat; H100; Areia	22%
V_Ca2	1:1:4	Vicat; H100; Areia	21%
V_Ca3	1:2:6	Vicat; H100; Areia	20%
C_1,2	1:2	CEM I ; areia	13%
C_Ca	1:1:4	CEM I ; H100; Areia	14%

Para cada formulação foram confeccionados 9 provetes prismáticos com uma percentagem de água de amassadura na ordem dos 13 a 23%, relativamente ao peso total dos sólidos. A quantidade de água de amassadura adicionada às composições foi a suficiente para ser alcançada a trabalhabilidade adequada, de aproximadamente 140mm.

Como é conhecido, as argamassas em que o único interveniente é o cimento, apresentam inconvenientes bem conhecidos no que respeita a revestimentos exteriores. As argamassas de cimento exteriorizam um aspeto bem diferente das argamassas antigas, apresentam ainda excessiva rigidez e, ainda uma capacidade limitada de permitir a secagem do seu suporte (Veiga, 2003).

De forma a estabelecer uma base comparativa, para além de argamassas com cimento natural foram analisadas argamassas com NHL 3,5 e cal área e as argamassas de cimento Portland CEM I como referência padrão.

4.2.2. Preparação dos provetes

Para a realização das argamassas segundo a norma EN 1015-2:1998, em primeiro lugar procedeu-se à pesagem dos seus constituintes (agregados e ligantes). De modo a misturar os seus componentes secos colocou-se a mistura em sacos plásticos e agitou-se.

Após introduzir a quantidade de água determinada no recipiente da misturadora, adicionaram-se os componentes sólidos, ligantes e agregado, e misturou-se com o auxílio de

uma espátula. A misturadora foi ligada na velocidade mais baixa para homogeneizar durante 15 segundos.

Em seguida, parou-se a misturadora e raspou-se com a espátula o material que ficou agarrado às paredes do recipiente. Completou-se a mistura à velocidade por mais 75 segundos.

Para a execução dos provetes normalizados foram utilizados moldes prismáticos de dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, em conformidade com a norma NP 196-1.

Nestes foi aplicado previamente óleo descofrante nas superfícies interiores do molde de modo a garantir uma correta desmoldagem dos provetes. O preenchimento dos moldes foi realizado em duas camadas. Na primeira camada preencheu-se até metade da altura do molde, efetuando-se uma compactação com aproximadamente 10 pancadas com ajuda de um pilão prismático. Na segunda camada preencheu-se o restante espaço do molde sendo executada uma compactação de igual forma. Por fim, os moldes foram colocados na mesa vibratória para uma melhor compactação da mistura, como se observa na Figura 18.



a) Misturadora de argamassas

b) Enchimento dos moldes normalizados

c) Mesa de vibração

Figura 18 – Várias fases do processo de execução de argamassas

4.2.3. Metodologia de cura

A metodologia de cura dos provetes realizados seguiu uma adaptação da norma EN 1015-11. Para cada formulação foram efetuados 9 provetes de modo a analisar três condições de

cura diferentes. Na condição de cura C1, foram utilizados 3 provetes para cada formulação, estes ficaram 7 dias sujeitos a ambiente de laboratório e colocados os restantes 21 dias numa câmara a 20° C e 65 % de humidade relativa. Relativamente à condição de cura C2, foram colocados os 3 provetes diretamente numa câmara climática, em condições controladas de 20° C e 65 % de humidade relativa, durante os 28 dias, Figura 19 b). Os restantes 3 provetes foram colocados numa câmara de 20° C e 95 % de humidade relativa, também durante 28 dias, denominando-se como condição de cura C3, Figura 19a). Os provetes das diferentes curas foram descofrados ao final do sétimo dia nos moldes.



a) Provetes em condicionamento húmido, C3



b) Provetes em condicionamento seco, C2

Figura 19- Condicionamento de provetes

4.2.4. Ensaios realizados

Neste subcapítulo, serão descritos os ensaios e respetivos procedimentos relativos às argamassas de substituição. O estudo foi iniciado com ensaios às matérias-primas, nomeadamente de DRX, de granulometria e massa volúmica aparente dos materiais. Seguidamente procedeu-se à preparação e execução dos provetes prismáticos recorrendo também ao ensaio de espalhamento.

Com o intuito de descobrir se as novas formulações de argamassas têm um bom comportamento face à água, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem. Assim como, foi determinado a resistência à compressão e à tração por flexão aos

28 dias, controlo de carbonatação e o seu módulo de elasticidade dinâmico, como se apresenta na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaaios realizados e respetiva norma

Ensaaios	Normas
Massa volúmica aparente	EN 1015-6:1998
Consistência por espalhamento	EN 1015-3:1998
Absorção da água por capilaridade / Secagem	EN 1015-18:2002
Resistência à tração por flexão	EN 1015-11:2000 (adaptado)
Resistência à compressão	EN 1015-11:2000 (adaptado)
Controlo de carbonatação	Procedimento adaptado
Módulo de elasticidade dinâmico	BS1881-203:1986

4.2.4.1. Massa volúmica aparente seca

A determinação da massa volúmica aparente foi efetuada segundo a norma EN 1015-6:1998. Este ensaio foi realizado com objetivo de determinar a massa volúmica aparente das matérias-primas que compõem as argamassas de substituição. Foi realizado antes da execução dos provetes, de modo a determinar as quantidades de agregado e ligantes necessários.

Numa primeira instância pesou-se o recipiente vazio (g) na qual corresponde à capacidade de 1 litro. Seguidamente, encheu-se o recipiente com a matéria-prima em análise, com recurso a uma pá. O bordo da pá nunca deverá estar a mais de 5 cm de distância do topo do recipiente, de modo a uniformizar o enchimento. Por último, procedeu-se ao nivelamento da superfície evitando qualquer compactação e pesou-se o conjunto, como se pode observar na Figura 20. Repetiu-se este procedimento três vezes para cada material, para posteriormente ser determinado o valor médio da massa volúmica aparente.



Figura 20 – Registo fotográfico do ensaio de massa volúmica aparente

4.2.4.2. Ensaio de espalhamento

A consistência de uma dada argamassa no estado fresco pode ser avaliada recorrendo ao ensaio de espalhamento, parâmetro que poderá ser avaliado pela trabalhabilidade.

A trabalhabilidade é um fator de grande importância numa argamassa, principalmente quando tem a finalidade de ser aplicada como revestimento. Uma vez não adicionados aditivos, a trabalhabilidade pode ser regulada pela quantidade de agregados finos, teor de ligante ou da quantidade de água de amassadura. (VEIGA, 1998).

A quantidade de água de amassadura é um fator importante na hidratação dos ligantes, no caso de cimentos e cal hidráulica, que irá influenciar no valor da sua consistência (Rodrigues, 2004).

Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-3:1998. O ensaio é iniciado colocando o molde tronco-cônico centrado na mesa de espalhamento onde será introduzida a argamassa fresca. Foram colocadas duas camadas de cada vez, cada uma compactada com pelo menos 10 pequenas pancadas com o pilão, de modo a assegurar o enchimento uniforme do molde. Em seguida, rasou-se a superfície do molde com uma espátula com o fim de retirar a argamassa em excesso, Figura 21 a), e removeu-se o molde. Para permitir o espalhamento da argamassa roda-se a manivela durante 15 segundos, a uma frequência constante de uma pancada por segundo. Por fim, é possível registar os diâmetros medidos em milímetros na mesa de espalhamento, como se pode observar na Figura 21b). No entanto, como o objetivo inicial era obter uma argamassa com espalhamento de aproximadamente 140 mm, com boa trabalhabilidade, a água foi ajustada durante o processo de modo a atingir esta finalidade e foi registado a quantidade de água colocada adicionalmente.



a) Molde tronco-cônico



b) Medição ensaio de espalhamento

Figura 21 – Registo fotográfico do ensaio de espalhamento

4.2.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico, E_d , é um parâmetro mecânico permite avaliar a rigidez de um material. Quanto maior for o seu valor maior será a rigidez da argamassa em estudo e menor será a sua deformabilidade.

O ensaio foi realizado sobre provetes prismáticos com o aparelho PUNDIT. Inicialmente calibrou-se o aparelho (Figura 22 a)) e utilizou-se uma cera de contacto entre os transdutores e a argamassa para promover o contacto entre eles. Os transdutores foram posicionados nos extremos do provete de modo a possibilitar que as ondas ultrassónicas percorram o comprimento de cada argamassa, como se pode observar na Figura 22 b). Após o posicionamento dos transdutores foram registados os tempos que cada onda demorou a percorrer a amostra e, em função desses dados, determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico para cada formulação, segundo a equação 4.8 e 4.9.

$$E_d = \rho \times V^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (4.8)$$

Onde:

ρ = Densidade da argamassa em estado endurecido (kg/m^3)

V = velocidade que a onda ultrassónica leva para percorrer o provete, no sentido longitudinal (Km/s)

$\nu = 0,2$ (Silva e Campiteli, 2008)

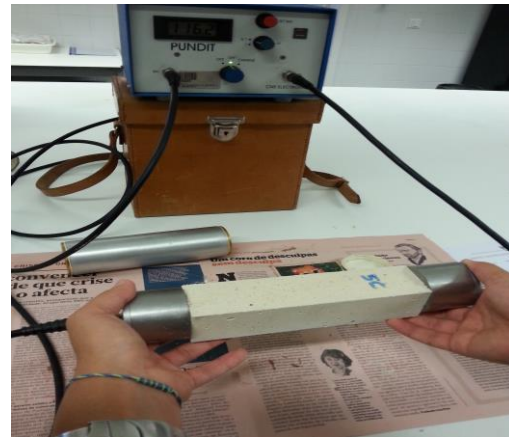
$$V = d/t \quad (4.9)$$

d = comprimento do provete (km)

t = tempo (segundos) que a onda ultrassónica leva a percorrer a distancia d , obtido através do equipamento PUNDIT



c) Calibração do PUNDIT



d) Medição

Figura 22- Registro fotográfico ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

4.2.4.4. Resistência à tração por flexão

Após os ensaios do módulo de elasticidade, os mesmos provetes foram utilizados para realizar o ensaio de resistência à tração por flexão, pois o primeiro ensaio não é destrutivo. Este procedimento decorreu segundo a norma EN1015-11, com o auxílio da máquina universal de ensaios da marca SHIMADZU, modelo IC 100 kN.

Neste ensaio, o provete foi colocado no equipamento sobre os sistemas de apoio, que distam entre si 100mm, tendo sido devidamente centralizado para que a força exercida fosse aplicada perpendicularmente e a meio do provete.

Foram usadas as células de carga de 5 kN e 100 kN e que foram aplicadas com uma velocidade constante de 10N/seg, até os provetes atingirem a sua rotura. O valor da tensão de rotura à flexão, considerado neste trabalho, é a média dos valores obtidos nos 3 provetes ensaiados.

Assim, a resistência à flexão do provete é dada através da expressão 4.10.

$$R_f = 1,5 \times \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (4.10)$$

Onde,

F = carga máxima aplicada, [N];

L = distância entre os eixos de apoio do provete, [100mm];

b = largura do provete, [40mm];

d = espessura do provete, [40mm];



Figura 23 – Registo fotográfico do ensaio de resistência à flexão

4.2.4.5. Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11, utilizando metade de cada provete testado à flexão, empregando o mesmo procedimento e a mesma máquina de ensaios da resistência à flexão, como se pode observar na Figura 24a). O valor da tensão de rotura à compressão considerado é a média dos valores obtidos nos 3 provetes.

Foram usadas células de carga de 5 kN e 100 kN, a uma velocidade de 50 N/seg de modo a que ocorresse a rotura num período de 30s a 90s. O resultado da resistência à compressão é calculado pela equação descrita em 4.1.2.5, equação 4.3.



e) Esmagamento à compressão



f) Rotura à compressão de um provete

Figura 24- Registo fotográfico ensaio de resistência à compressão

4.2.4.6. Profundidade de carbonatação

O controlo da carbonatação foi efetuado logo após o ensaio de compressão, sobre as superfícies de rotura dos meios provetes que daí resultaram. Pulverizou-se as superfícies com uma solução alcoólica de fenolftaleína 0,2%, que reage mudando de cor, em contacto com material de pH alcalino presente nas argamassas. A alteração para cor púrpura identifica zonas alcalinas (não carbonatadas), ao passo que as zonas onde não há alteração de cor são zonas neutras ou ácidas (carbonatadas), Figura 25. Por fim, com auxílio de uma craveira mede-se e regista-se a profundidade de carbonatação observada na secção de rotura de cada meio provete.



Figura 25 - Registo fotográfico ensaio de carbonatação dos provetes

Por outro lado, embora o contacto da superfície do provete no molde e a espessura do próprio provete possa não constituir um fator crítico em argamassas de cimentos, estes parâmetros influenciam muito a presa de argamassas com base em cal, pois a redução do contacto superficial com a atmosfera ambiente diminui o contacto com o dióxido de carbono, necessário à carbonatação da cal, o que retarda a presa e a cura das argamassas (Rodrigues, 2004).

4.2.4.7. Absorção da água por capilaridade

O ensaio de absorção da água por capilaridade foi realizado analogamente às amostras antigas recolhidas dos edifícios em estudo, conforme o descrito no ponto 4.1.2.6.

Contudo, foram aplicados os procedimentos definidos na norma EN 1015-18, sem adaptações, pois a execução de novas argamassas permite obter provetes de dimensões normalizadas.



Figura 26 – Registro fotográfico ensaio de absorção da água por capilaridade

4.2.4.8.Determinação do índice de secagem

Idêntico ao ensaio anterior, a determinação do índice de secagem foi realizado conforme o descrito no ponto 4.1.2.7.

Capítulo 5

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo pretende-se apresentar e analisar os resultados obtidos dos ensaios anteriormente descritos. Analogamente ao capítulo anterior, a discussão será realizada em duas fases, primeiramente em relação às argamassas provenientes dos edifícios em estudo e posteriormente são apresentados os resultados e é realizada uma análise ao comportamento das argamassas de substituição.

5.1. Análise das argamassas antigas

Na Tabela 6 apresenta-se a listagem das amostras provenientes do Teatro Nacional São João, do Mercado do Bolhão e do Palácio Oscarshall, assim como os respetivos ensaios realizados a estas argamassas.

Tabela 6 - Listagem de amostras e respectivos ensaios realizados

Amostras	DRX	FRX	Dissolução ácida	Granulometria	Resistência à compressão	Absorção capilar / Secagem	Sais solúveis
TPo-1	X				X	X	
TPo-2	X	X	X	X	X	X	
TPo-3	X	X	X	X	X	X	
TPo-4	X	X				X	X
TPo-5	X	X	X	X	X	X	
TPo-6			X	X	X		
TPo-7	X	X	X	X	X	X	
TPo-8		X	X	X	X	X	
TPri-1						X	
TPri-2	X	X	X	X	X	X	
TPri-3			X	X			
TPri-4	X	X	X	X	X	X	
TN-1			X	X	X		
TN-2	X	X	X	X	X	X	
T-1	X		X	X		X	
T-2	X	X	X	X	X	X	
T-3			X	X		X	
T-4	X	X	X	X	X	X	X
T-5a	X		X	X			
T-5b	X		X	X			
T-6	X	X	X	X	X		
T-7	X	X	X	X	X		X
T-8	X	X	X	X	X		
T-9	X	X					X
T-10					X	X	
MB-1a	X	X	X	X	X	X	X
MB-1b						X	
MB-2a	X		X	X	X	X	X
MB-2b	X					X	
OSC	X				X	X	

5.1.1. Determinação da relação ligante/agregado por dissolução ácida

O presente ensaio traduz a percentagem de fração solúvel e insolúvel após o ataque com ácido clorídrico, permitindo apontar para o traço de ligante/ agregado existente em cada amostra. As amostras utilizadas neste ensaio são provenientes do Teatro Nacional São João e do Mercado do Bolhão.

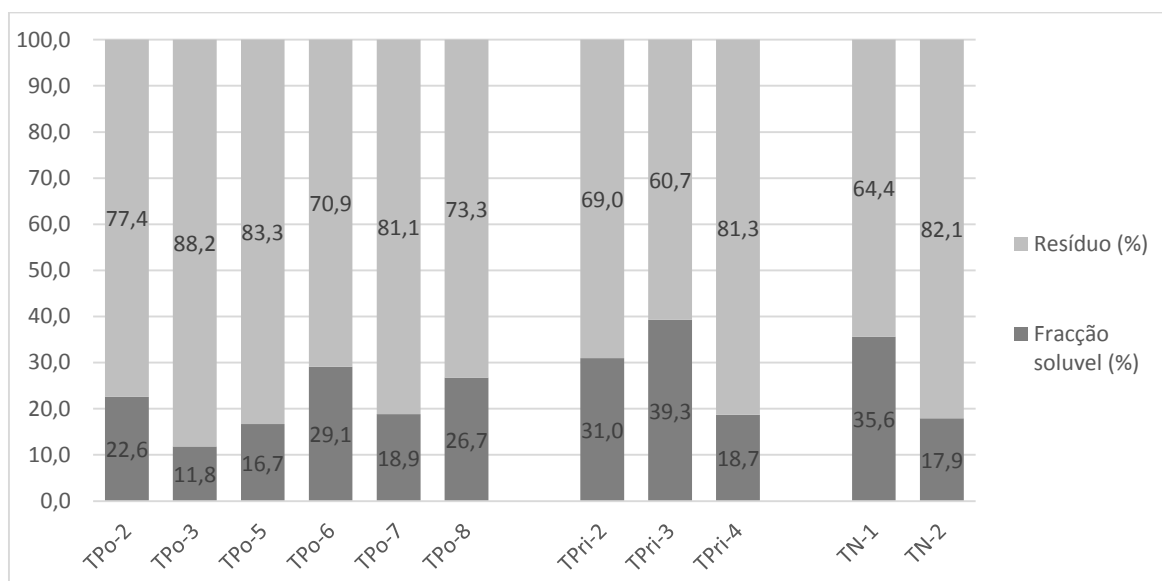


Figura 27- Fração solúvel e resíduo após dissolução ácida - Fachada poente, principal e nascente TNSJ

Nas argamassas provenientes da fachada poente do Teatro Nacional São João o resultado da fração solúvel varia entre os 12% e os 29%. Da amostra TPO-3 resultou após ataque ácido maior percentagem de resíduo, sugerindo assim maior quantidade de agregado. Situação oposta é verificada na amostra TPO-6, ao evidenciar um traço mais forte em resíduo solúvel e por isso maior quantidade em ligante. As restantes argamassas da fachada poente apresentam percentagens intermédias de fração solúvel e insolúvel comparativamente a estas duas anteriores. No que diz respeito às argamassas retiradas da fachada principal, as amostras TPri-2 e TPI-3 revelam uma percentagem de fração solúvel semelhante entre si. Contudo a amostra TPri-4 apresenta uma percentagem de fração solúvel muito mais baixa comparada com as amostras provenientes da mesma fachada. As amostras retiradas do alçado nascente do edifício apresentam resultados distintos, sendo a percentagem de resíduo insolúvel na amostra TN-2 mais elevada que a amostra TN-1.

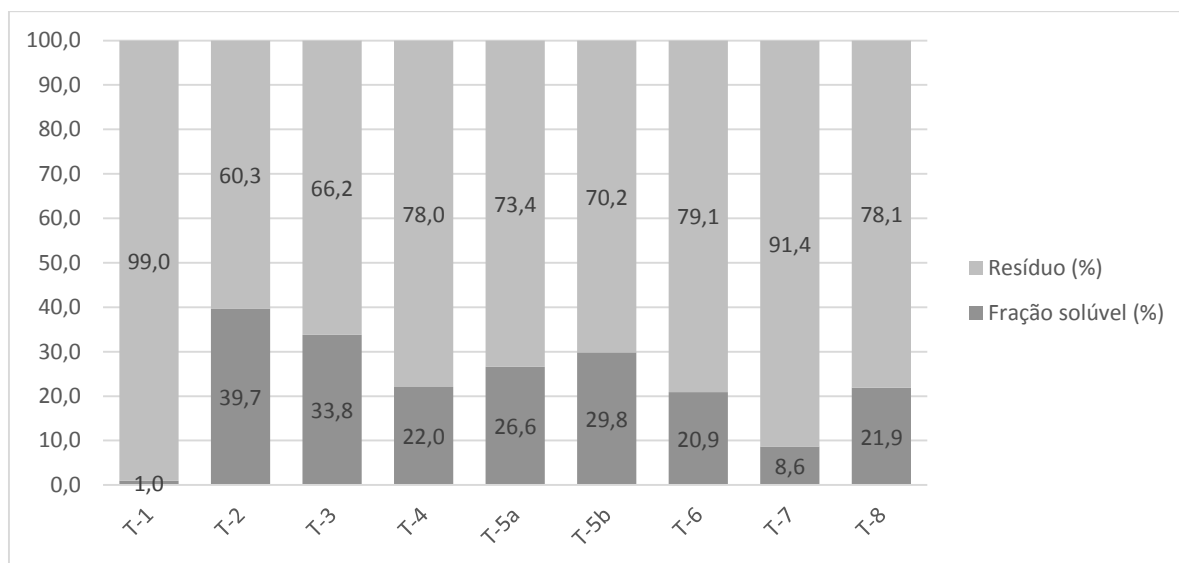


Figura 28- Fração solúvel e resíduo após dissolução ácida - Amostras TNSJ

No grupo de amostras em que não foi identificada a fachada de origem, os resultados apresentam variabilidade nas percentagens de fração solúvel. As amostras T-1 e T-7 encontram-se muito perto dos 100% de resíduo insolúvel, apontando assim para uma escassa existência de ligante. Nas amostras T-4, T-6 e T-8 as percentagens de resíduo são equivalentes entre si, estando todas na mesma ordem de grandeza. A argamassa T-5 encontra-se dividida em a e b, pois aparentemente aponta para uma possível intervenção no passado apresentando duas camadas distintas, como se pode observar na Figura 9 a). Porém os resultados na dissolução ácida apresentam-se idênticos nesta amostra. Relativamente às argamassas T-2 e T-3 são as amostras com maior quantidade de fração solúvel de todo o grupo, indicando maior percentagem de ligante.

Considerando de forma aproximada que a percentagem de fração solúvel indica a quantidade de ligante e a fração de resíduo insolúvel o agregado, as argamassas pertencentes ao Teatro Nacional São João apresentam traços distintos. No entanto, os traços estimados mais representativos da relação ligante/agregado são 1:2 e 1:3.

Analisando ainda os diversos elementos pertencentes às fachadas, destacam-se as amostras referentes a ornamentos, como é o caso da argamassa TPo-7 e TN-2, com traços similares, na ordem de 1:4. Contudo, verifica-se que as amostras retiradas de elementos como as figuras apresentam traços distintos. Neste caso, distinguem-se as amostras TPo-5 e TPo-6 ambas pertencentes às máscaras de figuras femininas e masculinas presentes na fachada poente, mas com traços de aproximadamente de 1:5 e 1:2,4 respetivamente.

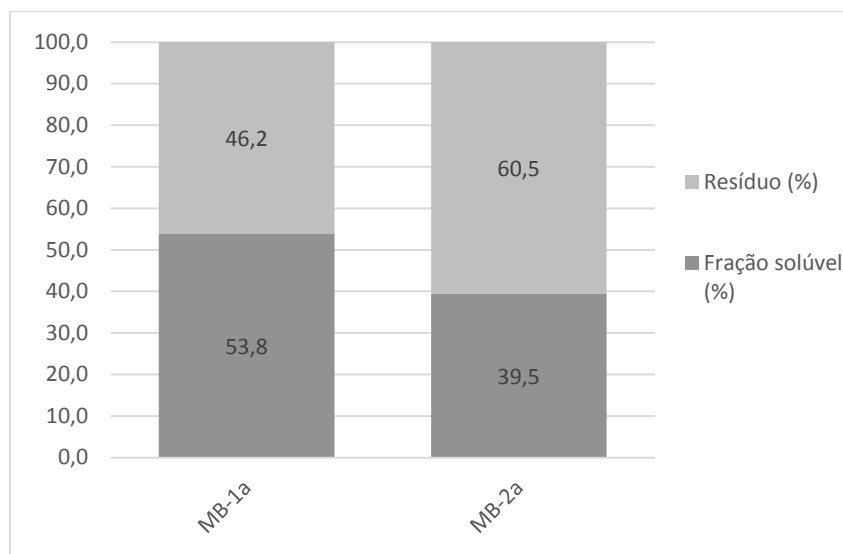


Figura 29- Fração solúvel e resíduo após dissolução ácida - Mercado do Bolhão

Relativamente às amostras provenientes do Mercado do Bolhão os resultados são distintos. A argamassa MB-1a apresenta percentagem maior de fração solúvel, comparativamente à fração do resíduo, apontando assim para uma maior quantidade de ligante. No que diz respeito à amostra MB-2 a fração solúvel é inferior à percentagem obtida no resíduo manifestando maior quantidade de agregado.

Salienta-se ainda, que este método poderá compreender algum erro nos resultados, pois embora se considere que o resíduo corresponde à parte siliciosa do agregado, o ácido poderá dissolver parcialmente os materiais cristalinos presentes (Velosa,2006).

5.1.2. Análise granulométrica

Para a análise granulométrica foram preparadas amostras representativas das várias fachadas pertencentes do Teatro Nacional São João e ao Mercado do Bolhão. Da Figura 30 à Figura 35, apresentam-se as respetivas curvas granulométricas.

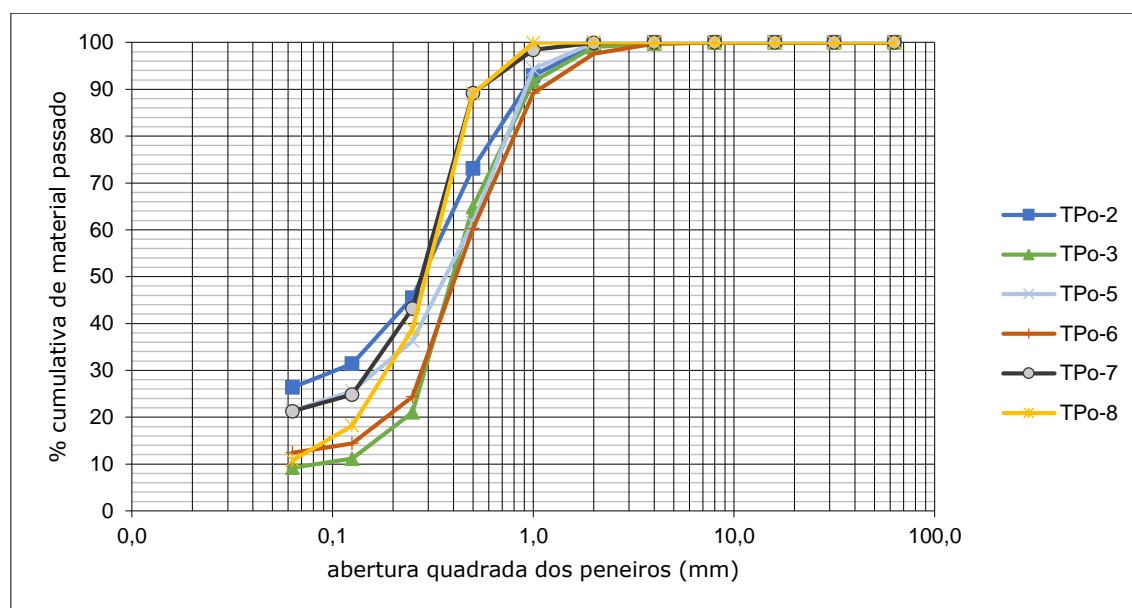


Figura 30- Curvas granulométricas - Fachada poente TNSJ

As argamassas com origem na fachada poente do Teatro Nacional São João apresentam uma distribuição granulométrica semelhante entre si. Destacam-se as amostras TPo-3 e TPo-6, em que os seus traçados são praticamente coincidentes, com uma granulometria centrada entre os 0,5 mm e 0,25 mm com aproximadamente 71% e 65% material retido nestes peneiros. As argamassas TPo-7 e TPo-8, exibem uma distribuição muito idêntica no agregado passado entre o peneiro 0,25 mm e 0,125 mm, correspondendo a 64% e a 71% respetivamente, de material retido nestes peneiros. Distinguindo-se na percentagem de finos passados no peneiro 0,063 mm, com aproximadamente 21% e 11% respetivamente. Em relação às amostras TPo-2 e TPo-5, estas apresentam uma granulometria centrada no intervalo de 0,5 mm e 0,25 mm, à semelhança das amostras TPo-3 e TPo-6, mas com apenas 47% e 58 % de agregado retido nestes peneiros. No entanto apresentam as maiores percentagens de finos passados no peneiro 0,063mm de entre todas as amostras.

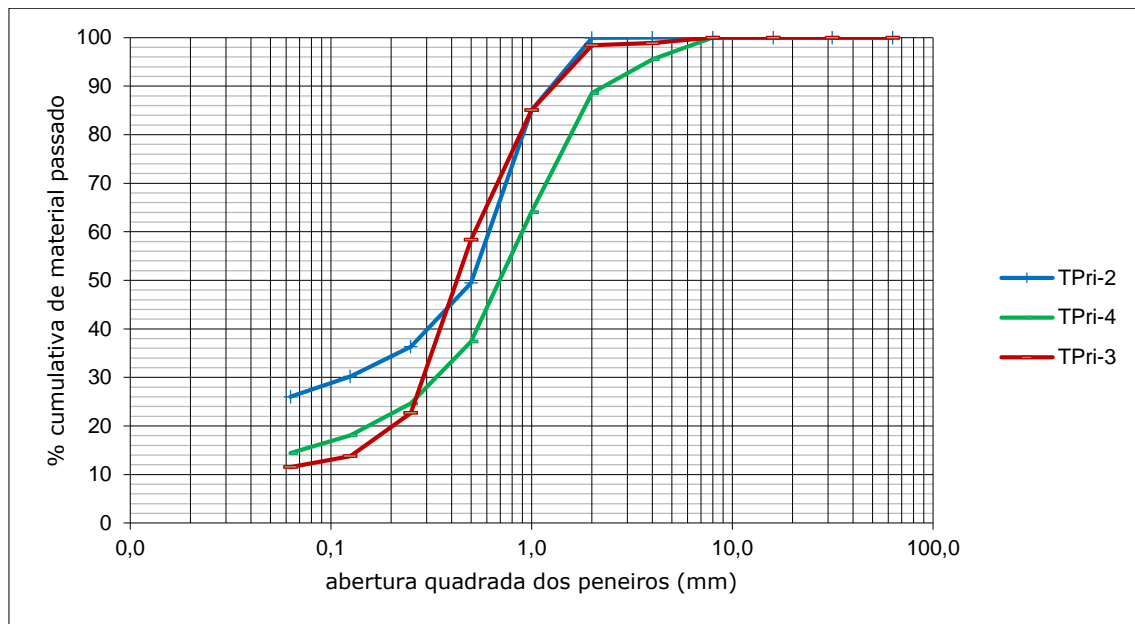


Figura 31- Curvas granulométricas - Fachada principal TNSJ

Neste grupo de amostras as argamassas TPri-2 e TPri-4 apresentam uma granulometria centrada entre os 1,0 mm e 0,5 mm, enquanto a amostra TPri-3 se encontra entre os 0,5mm e 0,25 mm.

Verifica-se ainda, que apesar das amostras TPri-3 e TPri-4 pertencerem ambas ao reboco da mesma fachada apresentam curvas granulométricas diferentes, sendo que a amostra TPri-4 é composta por agregados de maiores dimensões.

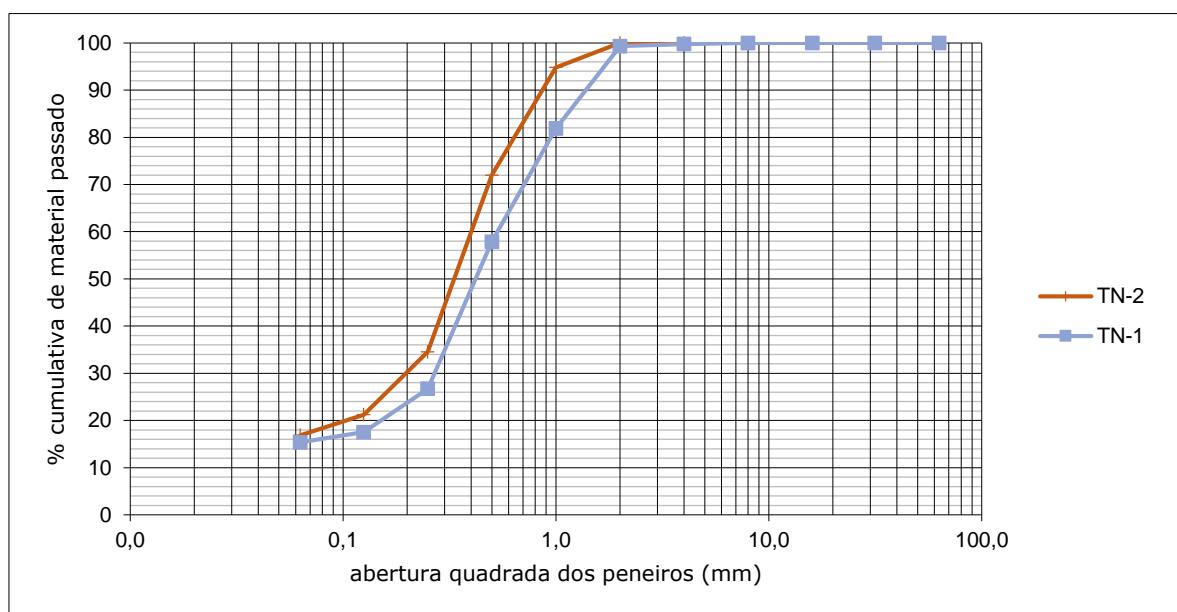


Figura 32- Curvas granulométricas - Fachada nascente TNSJ

As amostras da fachada nascente do Teatro Nacional São João, TN-1 e TN-2, indicam que a maior percentagem de agregado se acumula entre os peneiros de 0,5mm e 0,25mm, com 55% e 60% respetivamente. No entanto, amostra TN-1 apresenta maior percentagem de agregado retido nos peneiro 1,0 mm, comparativamente à amostra TN-2. Já a amostra TN-2 apresenta maior quantidade de agregado retido nos peneiros de menor abertura, definindo assim um agregado com maior percentagem de finos. Ambas exibem uma quantidade similar de finos passados no peneiro 0,063 mm.

Destaca-se que as amostras representativas desta fachada foram ambas recolhidas de ornamentos florais, pertencendo apenas a pisos do edifício diferente e podem ser classificadas como similares, sendo possível que tenham sido utilizados os mesmos materiais e traços na sua formulação.

Na Figura 33, apresentam-se as curvas granulométricas representativas das restantes argamassas recolhidas no Teatro Nacional São João.

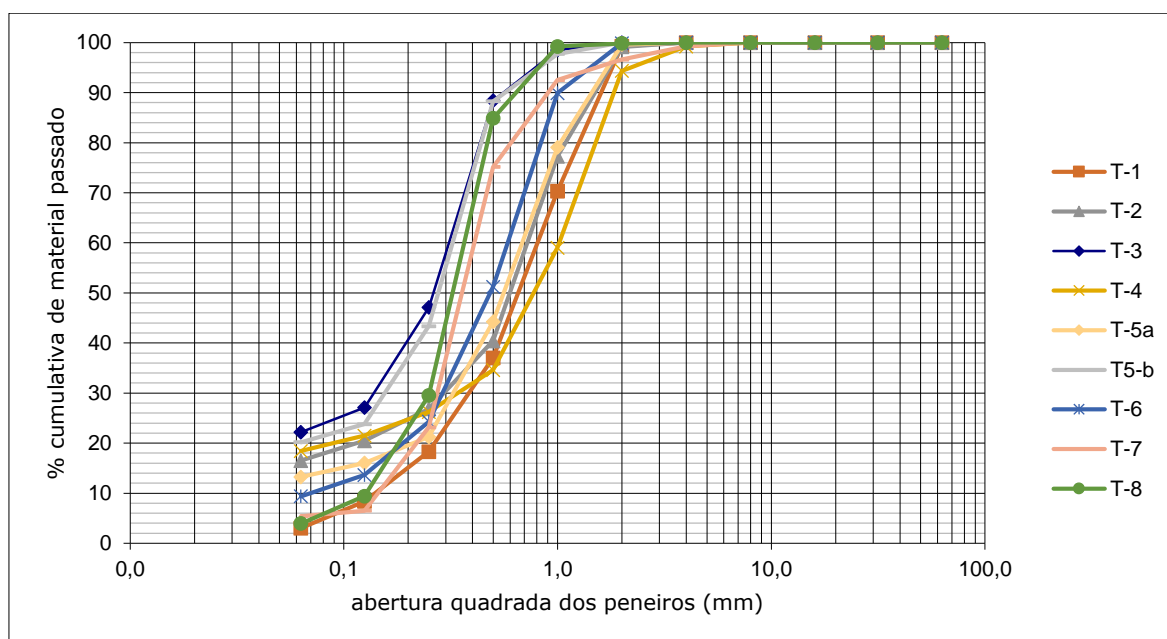


Figura 33- Curvas granulométricas - amostras TNSJ

Analisando este grupo de amostras, verificam-se argamassas com granulometrias distintas. Com maiores percentagens de agregado retido nos peneiros de 0,25mm e 0,125mm encontram-se as amostras T-3, T-5b e T-8. Estas duas primeiras apresentam curvas muito semelhantes e com aproximadamente 61% e 64% de material retido nestes peneiros,

enquanto a amostra T-8 apresenta aproximadamente 75%. Esta última amostra apresenta uma quantidade de agregado mais grosseiro, comparativamente as outras duas amostras, pois a quantidade de material retido nos peneiros acima de 0,25mm é maior.

As amostras T-5a, T-6 e T-7 são constituídas essencialmente por uma granulometria centradas entre os 0,5mm e 0,25mm. Desta forma, apresentam assim, percentagens de material retido nestes peneiros de 58%, 66% e 69%. As amostras T-6 e T-7 diferem sobretudo na quantidade de material acumulado retido até ao peneiro 0,5mm, sendo que amostra T-6 apresenta mais quantidade.

Como descrito anteriormente, as amostras T-5a e T-5b representam a mesma argamassa, no entanto apresentam camadas diferentes. Verifica-se com este ensaio que demonstram granulometrias diferentes, sugerindo que tenha existido uma possível intervenção no edifício.

Com maiores percentagens de agregado retido nos peneiros 1,0mm e 0,5mm apresentam-se as amostras T-1, T-2 e T-4, com aproximadamente 62%, 59% e 60%, demonstrando uma granulometria idêntica.

De modo geral, as argamassas provenientes do Teatro Nacional São João apresentam dimensão máxima de agregado entre 4mm e 2mm. Na sua maioria, as amostras são constituídas por uma granulometria centrada entre os 0,5mm e 0,25mm, principalmente nas amostras provenientes da fachada poente (TPo-2, TPo-3, TPo-5, TPo-6), da fachada a nascente (TN-1 e TN-2) e ainda uma das amostras da fachada principal (TPri-3). As amostras T-5a, T-6 e T-7 também representam este grupo apesar de a sua localização não ser conhecida. Com maiores percentagens de agregado retido entre os peneiros 1,0mm e 0,5mm, encontram-se as amostras pertencentes à fachada principal, TPri-2 e TPri-4, pertencentes a uma mísula e a um reboco respetivamente. As amostras T-1, T-2 e T-4, pertencem ao grupo anterior, sugerindo assim a utilização de agregado mais grosseiro. As amostras constituídas por agregados mais finos, de entre todas, são as amostras TPo-7, TPo-8, T-3, T-5b e T-8.

Contudo, apesar das amostras apresentarem diferentes granulometrias, observa-se que coloração do agregado apresenta diferentes tons entre amostras, sugerindo assim origens distintas. Este facto pode dever-se às reparações a que o Teatro Nacional São João foi sujeito com o passar dos anos. Na Figura 34 pode observar-se alguns resultados deste ensaio.

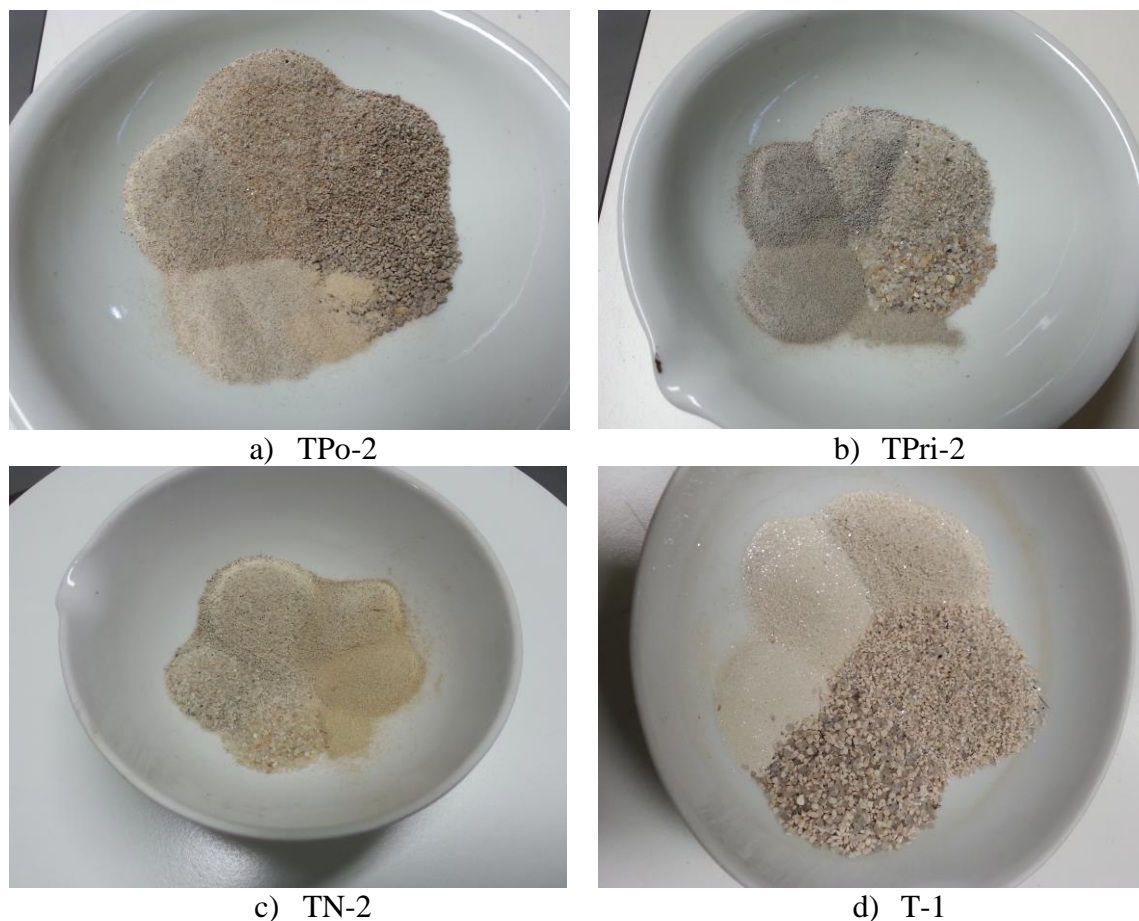


Figura 34-Registro fotográfico do resultado do ensaio de granulometria a algumas amostras

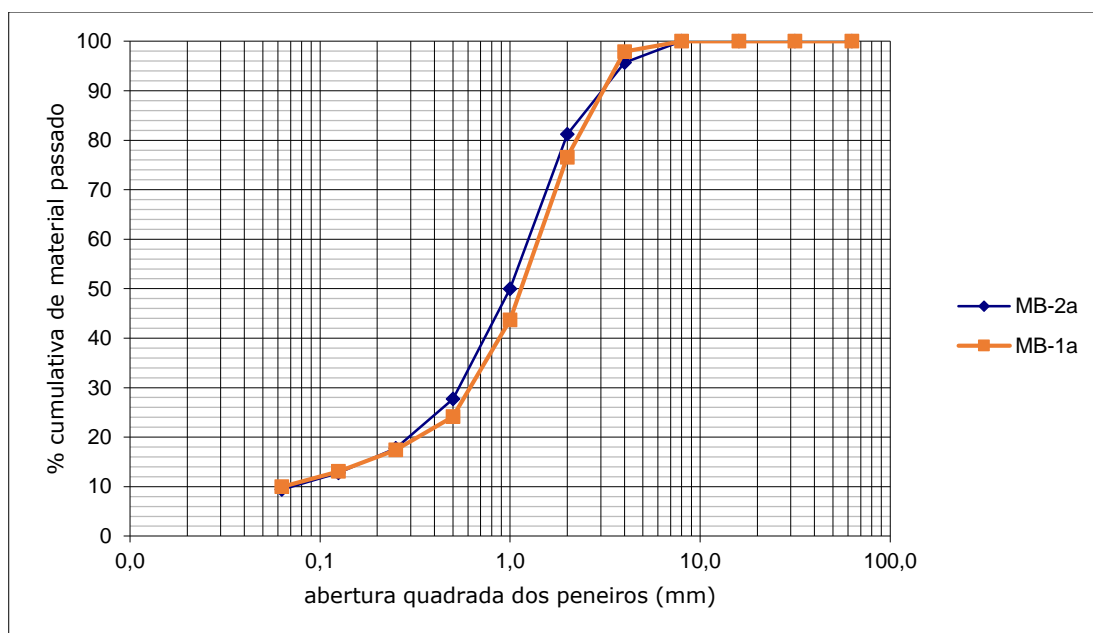


Figura 35 Curvas granulométricas - Mercado do Bolhão

Na análise às amostras recolhidas no Mercado do Bolhão consta-se duas curvas granulométricas resultantes do ensaio, muito similares entre as duas amostras. Com um traçado bastante uniforme, manifestando percentagens equivalentes de agregado acumulado entre as aberturas dos peneiros. A maior percentagem de material retido das amostras MB-1a MB-2a, encontra-se entre os peneiros de 1,0mm 0,5mm, com 52% e 54% respetivamente. A dimensão máxima de material apresentado nas amostras é de 4mm com uma percentagem de agregado passado no peneiro 0,063 na ordem dos 10%.

5.1.3. Análise Fluorescência de Raios X - FRX

Apresenta-se na Tabela 7 os resultados quantitativos relativos ao ensaio por Fluorescência de Raios X, preconizando as maiores componentes presentes em cada amostra.

Tabela 7 - Análise de resultados por FRX - amostras TNSJ

Amostras	Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Cl (%)	P.R (%)
TPo-2	0,22	1,06	4,44	31,25	0,09	2,11	1,05	38,04	0,23	2,31	0,02	18,89
TPo-3	0,39	1,04	4,72	27,71	0,11	4,41	1,10	37,84	0,21	2,77	0,19	19,33
TPo-4	0,30	0,78	6,34	31,10	0,10	2,13	1,47	33,19	0,24	2,53	0,12	21,52
TPo-5	0,67	0,87	4,26	25,55	0,07	5,86	1,45	35,23	0,20	2,81	0,36	22,43
TPo-7	0,35	1,13	5,29	28,00	0,08	2,40	1,16	35,94	0,27	2,37	0,09	22,74
TPo-8	0,30	1,21	5,28	26,94	0,09	2,22	1,51	36,21	0,32	2,19	0,12	23,42
TPri-2	0,30	0,88	4,99	47,34	0,08	1,32	1,55	28,82	0,23	1,63	0,03	12,70
TPri-4	0,19	0,83	5,76	25,21	0,31	1,74	0,89	37,09	0,24	3,64	0,27	23,63
TN-2	0,21	1,00	4,58	22,40	0,10	4,89	0,85	38,39	0,23	2,86	0,08	24,20
T-2	0,22	1,01	4,16	29,08	0,07	1,89	1,00	39,15	0,22	2,24	0,05	20,78
T-4	0,20	0,73	4,74	30,79	0,06	2,37	0,93	34,93	0,19	2,42	0,07	22,41
T-6	0,19	0,96	5,11	24,82	0,08	1,69	1,05	36,84	0,21	3,02	0,03	25,61
T-7	0,08	0,57	1,13	3,89	0,02	47,52	0,32	38,59	0,06	0,60	0,01	7,06
T-8	0,19	1,42	4,54	22,02	0,09	1,99	0,81	37,00	0,27	4,62	0,09	26,54
T-9	0,46	1,32	5,38	29,45	0,09	0,88	1,97	33,07	0,21	1,76	0,09	25,06

De acordo com análise química efetuada às amostras provenientes do Teatro Nacional São João, verifica-se que apresentam na sua maioria óxido de cálcio (CaO) como elemento predominante, com valores muito próximos entre si, com uma ordem de grandeza entre os 33% e os 39%. Sucedido ao óxido de cálcio, as amostras revelam conteúdo em sílica apreciável, na ordem dos 22% e os 31%. No entanto, a amostra TPri-2 e T-7 são exceção relativamente a estas anteriores. A amostra TPri-2 apresenta como componente principal óxido de silício (SiO_2), bastante superior ao óxido de cálcio e a amostra T-7 manifesta como elemento principal óxido sulfúrico e baixa quantidade de sílica. Destaca-se ainda a amostra TPo-4 com percentagens de sílica e óxido de cálcio muito próxima.

De modo geral, as amostras retiradas do TNSJ apresentam ainda óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido sulfúrico (SO_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) com percentagens muito apreciáveis. Sendo em geral, a alumina o terceiro componente principal entre as amostras. Destaca-se a amostra TPo-4, visto apresentar o maior teor deste óxido. A presença destes compostos argilosos sugerem a existência de um ligante hidráulico nas suas composições.

A presença de óxido sulfúrico poderá indicar a existência de gesso nas amostras, pois segundo a composição estequiométrica do gesso, a maior percentagem neste composto diz respeito a este óxido. Como referido anteriormente, a amostra T-7 exhibe os maiores valores, as amostras TPo-5, TN-2 e TPo-3 apresentam também teores consideráveis de óxido sulfúrico.

Verifica-se ainda, que a amostra T-8 ostenta o maior teor de óxido de ferro e óxido de magnésio (MgO) comparativamente às restantes amostras.

Os teores de óxido de potássio e magnésio apresentam valores relativamente significativos. A amostra T-9 contém a maior percentagem de óxido de potássio e maiores quantidades de óxido de magnésio.

O óxido de sódio (Na_2O) e cloro serão indicadores da presença de sais nas argamassas. Estes sais poderão ter origem no ambiente salino a que o edifício está exposto, pois encontra-se perto do mar.

Tabela 8 - Análise de resultados por FRX - amostra do Mercado o Bolhão

Amostras	Na₂O (%)	MgO (%)	Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	P₂O₅ (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	CaO (%)	TiO₂ (%)	Fe₂O₃ (%)	Cl (%)	P.R (%)
MB-1a	0,67	0,86	13,28	49,88	0,09	1,83	3,79	18,42	0,19	1,61	0,07	9,07

A análise química da amostra proveniente do Mercado do Bolhão apresenta elevado teor em sílica. Seguidamente, verificam-se quantidades de óxido de cálcio de apenas 18,42% e ainda um teor também próximo de óxido de alumínio, 13,28%. Como referido anteriormente, a presença de óxido sulfúrico poderá indicar a presença de gesso na argamassa. Destaca-se nesta amostra a presença significativa de óxido de potássio, com um teor elevado comparativamente às restantes componentes. A amostra apresenta ainda teores de óxido de sódio sinalizadores da presença de sais na sua composição.

Tabela 9- Análise de resultados por FRX - amostra Palácio Oscarshall

Amostras	Na₂O (%)	MgO (%)	Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	P₂O₅ (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	CaO (%)	TiO₂ (%)	Fe₂O₃ (%)	Cl (%)	P.R (%)
Osc	0,05	0,75	3,64	15,36	0,14	1,35	0,33	56,36	0,44	2,31	0,03	19,02

A amostra retirada do Palácio Oscarshall apresenta elevada percentagem de óxido de cálcio, seguido de baixos teores em sílica. As componentes em alumina e óxido de ferro apresentam valores significativos, apontando para o uso de um ligante hidráulico na sua composição. Verifica-se também que esta amostra apresenta baixos teores de óxido de sódio e de cloro, sugerindo a inexistência de sais na argamassa.

Destaca-se ainda, que a amostra retirada do Palácio Oscarshall apresenta a maior percentagem em óxido de cálcio comparativamente a todas as amostras estudadas neste ensaio. Já a amostra retirada do mercado do Bolhão apresenta a maior quantidade de sílica de entre todas.

Destaca-se ainda a amostra T-7 com elevadas quantidades de óxido sulfúrico comparativamente às restantes amostras e a amostra T-8 com maiores teores de óxido de ferro.

5.1.4. Análise Difração de Raios X - DRX

O estudo da composição mineralógica foi realizado por Difração de Raios X de forma a detetar as fases cristalinas presentes. Nas Tabela 10 à Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos no ensaio, figurando os minerais identificados nas diversas argamassas ensaiadas.

Tabela 10 - Análise de resultados por DRX - amostras fachada poente do TNSJ

Amostras	TPo-1	TPo-2	TPo-3	TPo-4	TPo-5	TPo-7	TPo-8
Calcite	+++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Aragonite	-	Vstg.	++	-	-	-	-
Vaterite	-	-	-	-	-	Vstg.	-
Dolomite	++	Vstg.	Vstg.	+	+	Vstg.	+
Magnesite	-	-	-	Vstg.	Vstg.	-	Vstg.
Nahcolite	-	Vstg.	Vstg.	-	+	-	
Quartzo	+++	+++	+++	++++	+++	+++	++++
Microclina	++	+	+	++	Vstg.	++	+
Albite	-	+	-	++	+	+	-
Caulinite	-	-	-	-	Vstg.	-	Vstg.
Mica/Ilite	++	++	++	+++	++	+	+++
Augite	-	Vstg.	-	Vstg.	-	Vstg.	-
Larnite		+	Vstg.	-	+	-	-
Hematite	Vstg	-	-	-		-	-
Gesso	-	-	+	-	++	-	-
Halite	Vstg	-	Vstg.	Vstg.	+	Vstg.	Vstg.
Pirite	Vstg.	-	-	Vstg.	-	-	-

(++++ para muito abundante a + para presente)

Tabela 11- Análise de resultados por DRX - amostras da fachada principal e nascente do TNSJ

Amostras	TPri-2	TPri-4	TN-2
Calcite	+++	++++	++++
Aragonite	+	-	-
Vaterite	-	-	-
Dolomite	Vstg.	+	+
Magnesite	-	-	-
Nahcolite	Vstg.	Vstg.	-
Quartzo	++++	+++	+++
Microclina	++	++	-
Albite	+	+	-
Caulinite	-	-	Vstg.
Mica/Ilite	Vstg.	+	+++
Augite	-	Vstg.	+
Larnite	++	-	-
Hematite	-	Vstg.	-
Gesso	-	-	+++
Halite	-	-	Vstg.
Pirite	-	Vstg.	Vstg.

(++++ para muito abundante a + para presente)

Tabela 12 - Análise de resultados por DRX - amostras do TNSJ

Amostras	T-1	T-2	T-4	T-5a	T-5b	T-6	T-7	T-8	T-9
Calcite	++	++++	++++	++++	++++	++++	++	++++	++++
Aragonite	+	-	-	-	Vstg.	+	-	-	-
Vaterite	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Dolomite	+	+	+	+	+	+	Vstg.	+	Vstg.
Magnesite	-	Vstg.	+	-	-	-	-	+	Vstg.
Nahcolite	-	Vstg.	Vstg.	Vstg.	-	-	-	Vstg.	+
Quartzo	++++	+++	+++	++++	+++	+++	+	+++	+++
Microclina	++	+	++	+++	++	++	-	++	+
Albite	++++	+	-	-	Vstg.	-	+	+	+
Caulinite	Vstg.	-	-	Vstg.	Vstg.	-	-	-	-
Mica/Ilite	++	++	++	+++	++	++	++	-	++
Augite	+	+	Vstg.	+	+	++	+	+++	-
Larnite	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hematite	Vstg.	-	Vstg.	-	-	-	-	-	-
Gesso	-	-	-	-	-	-	++++	-	-
Halite	-	-	Vstg.	-	-	Vstg.	Vstg..	-	+
Pirite	-	Vstg.	Vstg.	-	-	-	Vstg.	-	-

(++++ para muito abundante a + para presente)

Na análise mineralógica realizada nas argamassas provenientes do TNSJ, verifica-se a presença de calcite e quartzo em todas as amostras. A presença de quartzo indicará a existência de agregado silicioso nas amostras. As amostras, TPri-2, TPo-4 e TPo-8 apresentam neste ensaio grande abundância como se constata também nos resultados de FRX.

Foi possível detetar a presença de dolomite e magnesite em algumas amostras, nomeadamente na amostra TPo-1 e T-8 respetivamente. Possivelmente devido a proveniência do ligante usado nas argamassas.

No entanto, foram encontradas outras formas cristalinas de carbonato de cálcio, como a aragonite e a vaterite. Estes minerais são associados a fenómenos de dissolução-recristalização, pois são menos estáveis e mais solúveis em água. A aragonite apresenta-se em maior abundância comparada com a vaterite, a amostra TPo-3 representa a argamassas com maior quantidade de aragonite, enquanto a amostra T-4 a argamassa com maior quantidade de vaterite.

Dentro da classe dos filossilicatos, destacam-se a mica/ilite e caulinite. A mica/ilite apresenta-se em todas as amostras em proporções bastante consideráveis. À exceção da amostra T-8 que não se encontra presente. As amostras TPo-4, TPo-8, TN-2 e T-5a destacam-se de entre as outras na abundância de mica/ilite. A caulinite apresenta-se em algumas amostras sob a forma de vestígios, estando interligada com o estado de alteração das argamassas.

No grupo dos feldspatos potássicos, foi detetada a presença de microclina na maioria das amostras, e ainda sob a forma de plagióclases, a frequência de albite. A presença de quartzo, feldspatos alcalinos e plagióclases conjuntamente com acompanhamento de micas poderá indicar agregados provenientes de rochas graníticas.

Verificou-se a presença de larnite em algumas amostras, este mineral é também conhecido por belite, trata-se de um composto característico dos ligantes hidráulicos, sendo um constituinte anidro da cal hidráulica natural. Quando hidratado produz silicatos de cálcio hidratados e portlandite. Este resultado reforça análise de FRX e comprova a hidraulicidade dos ligantes utilizados.

Na análise das amostras T-7, TPo-5, TN-2 e TPo-3 verifica-se a presença de gesso. No entanto a amostra T-7 destaca-se por apresentar grande percentagem deste mineral,

assumindo-se assim ser uma amostra exclusivamente composta por gesso. Esta evidência é corroborada pelo ensaio de FRX, pois esta amostra T-7 apresenta teor considerável de óxido sulfúrico.

Denota-se ainda a existência de outros sais para além do gesso, como a halite e a nahcolite. Estes minerais encontram-se em forma de vestígio de uma maneira geral em grande parte das argamassas. Este resultado poderá surgir da exposição do edifício a uma zona matitima. A argamassa TPo-5 é amostra que apresenta maior quantidade destes dois sais.

Verifica-se ainda a presença de pirite em algumas amostras, este resultado poderá decorrer da oxidação do ferro. Pois as fachadas exteriores do Teatro Nacional São João foram revestidas a argamassa armada, em que as armaduras se encontram bastante oxidadas.

Do mesmo modo que a análise realizadas as amostras provenientes do teatro, as amostras recolhidas do Mercado do Bolhão foram analisadas pelo método de Difractomia de Raios X, Tabela 13.

Tabela 13 - Análise de resultados por DRX - amostras do Mercado do Bolhão

Amostras	MB-1a	MB-2a
Calcite	++++	++++
Aragonite	-	-
Vaterite	-	Vstg.
Dolomite	-	-
Magnesite	-	-
Nahcolite	-	-
Quartzo	++++	+++
Microclina	+	+
Albite	++	+
Caulinite	+	++
Mica/ Ilite	+++	+++
Augite	Vstg.	Vstg.
Larnite	+	-
Hematite	-	-
Gesso	++	++
Halite	-	-

(++++ para muito abundante a + para presente)

Na análise mineralógica às amostras provenientes do Mercado do Bolhão, verifica-se em ambas a presença de calcite e quartzo como componentes mais abundantes. Apenas na amostra MB-2a é identificado o carbonato de cálcio em outra forma cristalina, a vaterite. Numa das amostras provenientes deste edifício verifica-se a presença de larnite, como anteriormente descrito, presente em ligantes hidráulicos.

Ambas as amostras apresentam gesso na sua constituição, relação corroborada pelo resultado de FRX da amostra MB-1a que contem teores de SO₃. A caulinite é mais abundante na amostra MB-2a e poderá indicar maior degradação nesta amostra.

Em seguida, apresenta-se a análise de resultados relativos à amostras pertencente ao Palácio Oscarshall, Tabela 14.

Tabela 14- Análise de resultados por DRX - amostra do Palácio Oscarshall

Amostra	Osc
Calcite	+++
Quartzo	++
Wollastonite	+++
Dolomite	+
Albite	+
Portlandite	++
Etringite	+
Microclina	vstg.
Hematite	vstg.

(++++ para muito abundante a + para presente)

Na análise mineralógica à amostra retirada do Palácio Oscarshall, verifica-se de modo similar às restantes amostras a presença de calcite e quartzo, apesar de menos abundantes. No entanto esta amostra revela uma elevada presença de minerais de ordem cimentícia comparativamente a outras, nomeadamente a wollastonite e a etringite.

A wollastonite (CaSiO₃) representa o aluminato tricálcico C₃A (alite) pertencente as fases presentes nos ligantes hidráulicos, preferencialmente no cimento como composto principal. Na cal hidráulica este composto apenas pode-se encontrar presente em frações muito reduzidas, devido às altas temperaturas pontuais no processo de queima, pois este composto forma-se a elevadas temperaturas.

A etringite poderá resultar da hidratação dos ligantes hidráulicos ou de reações entre os ligantes cimentícios e fatores externos como o nevoeiro e a poluição.

5.1.5. Análise de resistência à compressão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão relativos às amostras recolhidas no Teatro Nacional São João encontram-se na Figura 36.

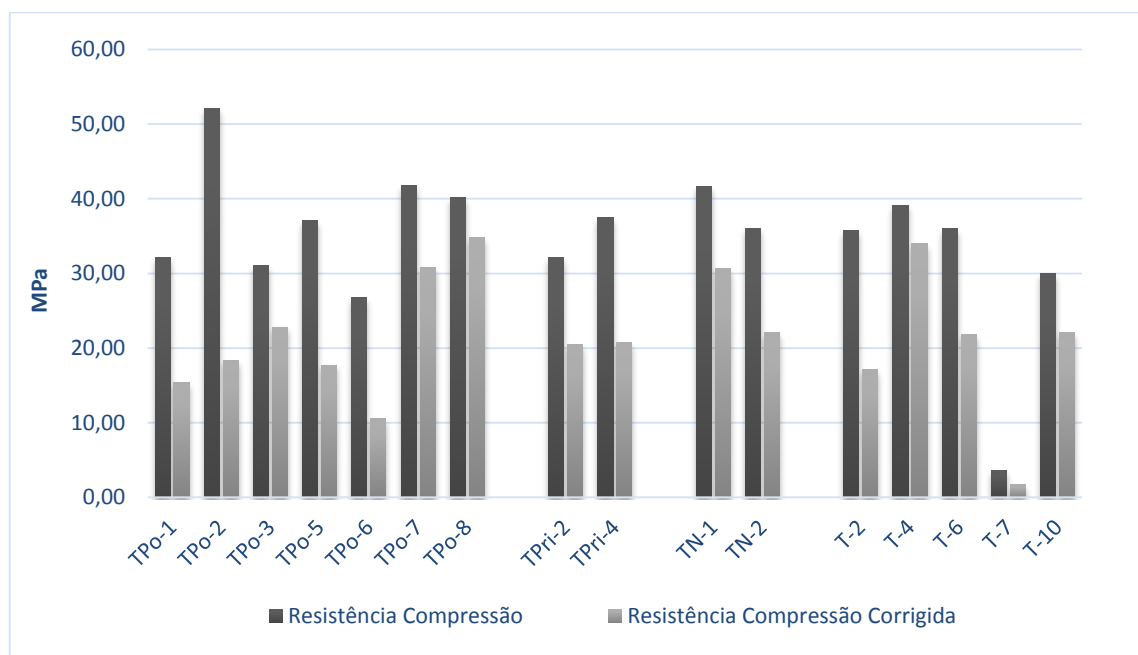


Figura 36- Resistência à compressão - amostras TNSJ

Após correção da resistência à compressão devido às amostras recolhidas terem diversas formas e alturas insuficientes à realização do ensaio, verifica-se maior discrepância de valores entre a resistência mecânica e a resistência mecânica corrigida em amostras que apresentam menor espessura. A amostra TPo-2 corresponde a uma altura de 1,2cm apresentando a maior diferença de valores. Já as amostras TPo-3 e TPo-8 apresentam menor diferença de valores pois tratam-se de amostras com 3cm e 3,5cm respetivamente. Ainda nas considerações do fator de correção, é de notar que a resistência à compressão da amostra T-7 foi corrigida segundo outro expoente, comparativamente às restantes argamassas. Segundo a análise visual e a análise por DRX trata-se de uma amostra composta por gesso, por isso torna-se pertinente o uso do expoente -1,9114, como se pode observar na equação 4.4. Nas restantes amostras torna-se pertinente a determinação da correção da resistência mecânica pelo expoente -1,065.

Analisando a resistência mecânica corrigida das argamassas provenientes do Teatro Nacional São João, verifica-se que as amostras TPo-8 e T-4 apresentam as maiores resistências à compressão, estando na ordem dos 35MPa e 34MPa respetivamente.

Seguidamente, com ordem de grandeza muito próxima das anteriores, encontram-se as amostras TPo-7 e TN-1 com valor de resistência de 31MPa ambas. A argamassa TPo-6 apresenta a resistência à compressão mais baixa, na ordem dos 11MPa. Assim sendo, analisando os valores de resistência à compressão de todas as argamassas provenientes das três fachadas e das restantes amostras, obtém-se uma média de resistência de 21MPa.

É de destacar que a amostra com maior valor de resistência à compressão correspondem a um elemento decorativo junto à varanda na da fachada poente e as amostras com baixa resistência a amostras retiradas das máscaras, na figura masculina.

Verifica-se ainda que as amostras TPo-8 e TPo-7 que resultam num maior valor de resistência à compressão são amostras com a maior percentagem de finos de entre as restantes amostras. Pode-se assim assimilar que argamassas com agregados de fração fina representam maior compacidade, aumentando assim o seu valor de resistência.

A argamassa T-7 apresenta um valor de resistência à compressão muito abaixo comparado com as restantes amostras. Este valor seria expectável pois, como analisado no ensaio de DRX, trata-se de uma amostra constituída essencialmente por gesso. No entanto, esta argamassa segundo o ensaio por dissolução ácida também revela ser detentora de um traço fraco em ligante, na ordem 1:10,6.

A presença de sais nas amostras poderá levar a que as argamassas se degradem, verifica-se assim que a amostra TPo-1 e TPo-5, segundo análise de DRX, são as amostras com maior teor de halite.

Na Figura 37 apresentam-se os resultados da resistência à compressão das amostras provenientes do Mercado do Bolhão e do Palácio Oscarshall.

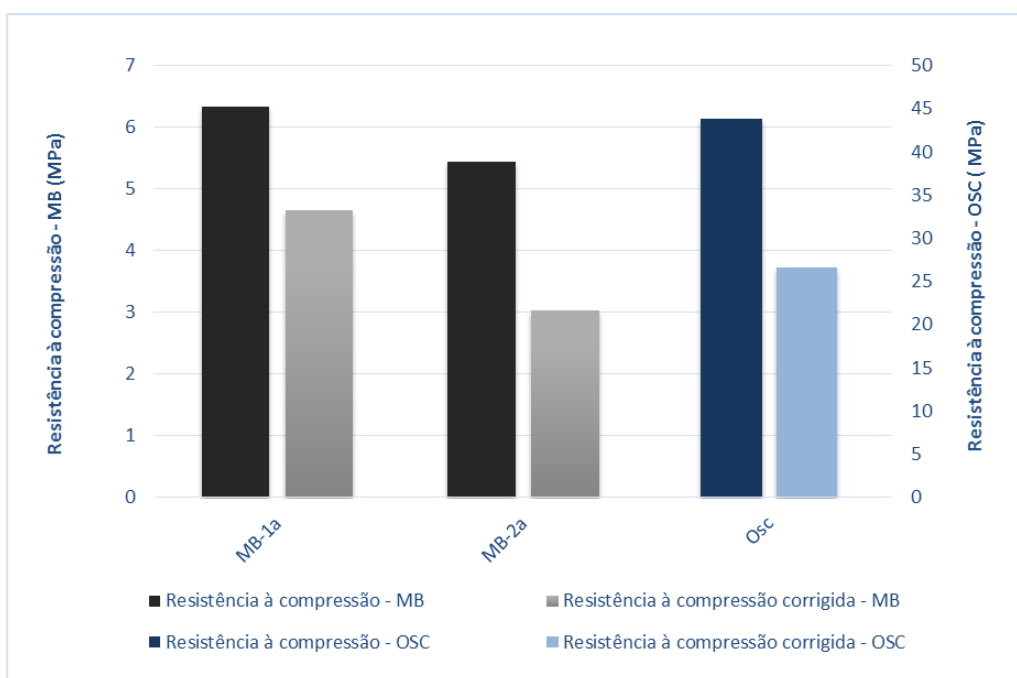


Figura 37 - Resistência à compressão - Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall

Observa-se que as amostras provenientes do Mercado do Bolhão obtiveram uma média de resistência à compressão de 3,84MPa e a amostra do Palácio Oscarshall um valor aproximado de 26,58MPa.

É ainda possível constatar que a amostra MB-1a apresenta maior resistência à compressão relativamente à amostra MB-2a, este resultado poderá surgir do facto da amostra MB-1a apresentar um traço mais forte em ligante do que a outra amostra, resultado obtido pelo ensaio de dissolução ácida. É possível ainda constatar pela análise de DRX a estas amostras, que a amostra MB-2a apresenta maior abundância em caulinite, composto que poderá contribuir para a sua degradação.

Refere-se ainda que devido à dimensão das amostras recolhidas e ensaiadas, poderão haver algumas discrepâncias inerentes.

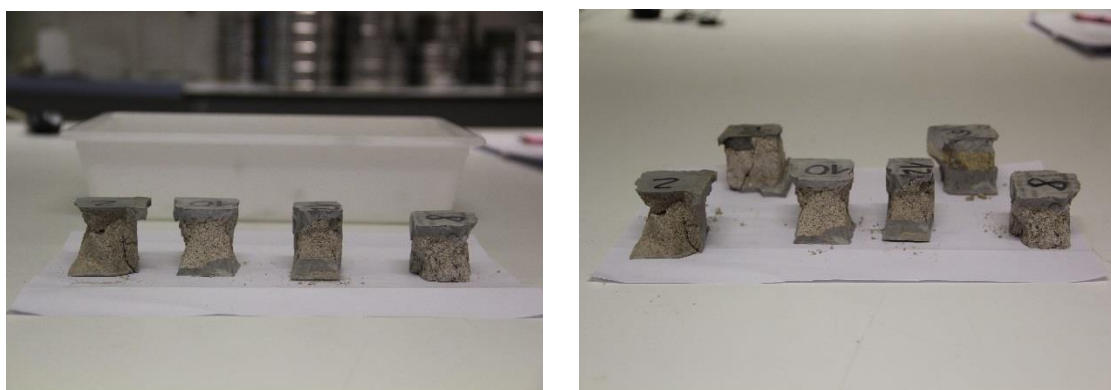


Figura 38- Exemplos de diferentes roturas após ensaio de resistência à compressão

5.1.6. Análise da absorção da água por capilaridade

Segundo a norma europeia EN 1015-18, o coeficiente de capilaridade representa o declive da reta tangente ao primeiro troço do gráfico de absorção de água ao longo do ensaio. Este coeficiente é determinado pela diferença de massa das amostras até aos primeiros 90 min. Os resultados deste ensaio foram obtidos segundo o descrito em 4.1.2.6.

Este ensaio de absorção da água por capilaridade foi aplicado a amostras relativas ao Teatro Nacional São João, ao Mercado do Bolhão e ao Palácio Oscarshall.

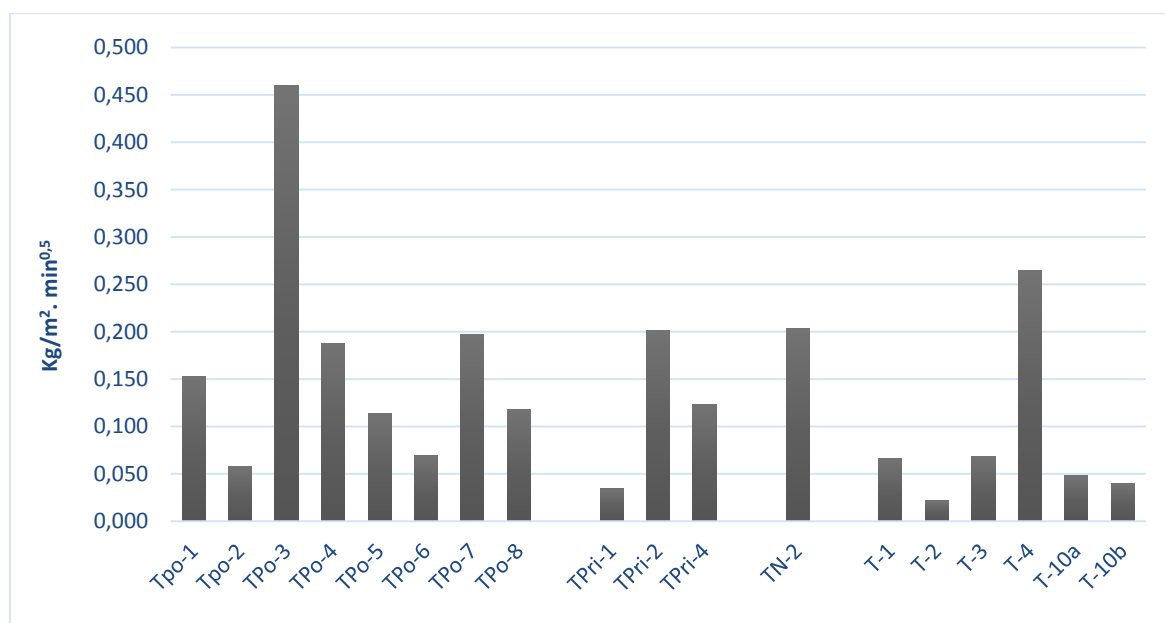


Figura 39- Coeficientes de capilaridade - amostras TNSJ

Como se pode constatar na Figura 39, as amostras representativas do TNSJ apresentam discrepância entre os valores do coeficiente de capilaridade. As argamassas provenientes do alçado poente do teatro variam entre os 0,057 e 0,460 Kg/m².min^{0,5} e da fachada principal entre 0,034 e 0,201 Kg/m².min^{0,5}. A fachada poente é representada por uma única amostra neste ensaio, que toma o valor de 0,203 Kg/m².min^{0,5}. Nas restantes amostras do teatro o coeficiente de capilaridade varia entre 0,022 e 0,264 Kg/m².min^{0,5}.

Verifica-se que os maiores coeficientes de capilaridade correspondem a argamassas de ornamentos pertencentes á fachada poente e nascente (TPo-3, TPo-7 e TN-2) e a uma amostra correspondente a uma mísula da fachada principal (TPri-2).

Como seria espectável, as amostras T-10a e T-10b apresentam diferentes valores de coeficiente de capilaridade, pois apesar de representarem a mesma argamassa, visualmente é notória a distinção entre materiais. O lado da argamassa apresenta maior valor comparativamente com o lado do barramento.

Analisando todas as amostras provenientes do Teatro Nacional São João, verifica-se que o coeficiente de capilaridade médio é de $0,141 \text{ Kg/m}^2.\text{min}^{0,5}$, o coeficiente de capilaridade mínimo de $0,021 \text{ Kg/m}^2.\text{min}^{0,5}$ e máximo de $0,459 \text{ Kg/m}^2.\text{min}^{0,5}$.

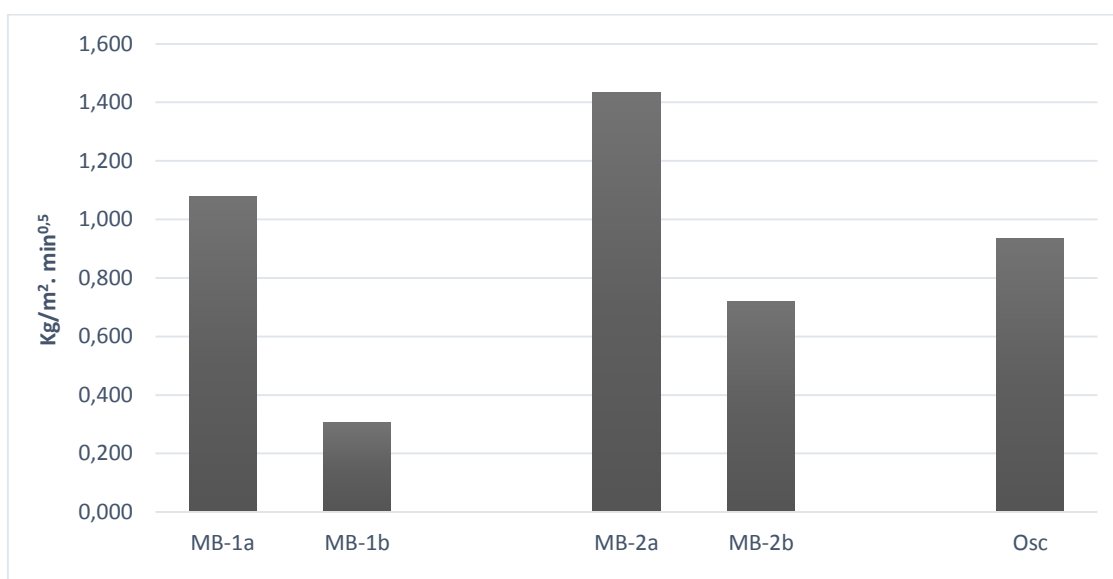


Figura 40- Coeficientes de capilaridade - amostras Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall

Da mesma forma que as restantes amostras analisadas, as amostras provenientes do Mercado do Bolhão foram sujeitas ao estudo do mesmo parâmetro. As amostras retiradas deste edifício possuem dois lados apontando para uma possível intervenção, surgindo assim denominações diferentes. O lado da argamassa é indicado com a letra “a” e o lado do barramento indicado com a letra “b”.

Os coeficientes de capilaridade das duas amostras do Mercado do Bolhão variam entre $0,307 \text{ Kg/m}^2.\text{min}^{0,5}$ e $1,434 \text{ Kg/m}^2.\text{min}^{0,5}$, enquanto a amostra retirada do Palácio Oscarshall toma o valor de $0,935 \text{ Kg/m}^2.\text{min}^{0,5}$. Como seria de prever, relativamente às amostras do MB, os lados com argamassa possuem maiores valores comparativamente aos lados com barramento. Na análise visual verifica-se que o lado da argamassa apresenta maiores dimensões de agregado, permitindo maiores espaços vazios entre partículas, possibilitando assim a penetração da água para o interior das amostras.

5.1.7. Análise índice de Secagem

O processo de secagem de uma amostra inicia-se após a sua saturação, representando o teor de água em relação ao tempo necessário para que a argamassa seque. Por conseguinte, o índice de secagem será um parâmetro de caracterização deste comportamento, determinado segundo o descrito em 4.1.2.7. Para o seu cálculo foi considerada a massa da amostra registada durante o processo de secagem, a massa inicial da amostra em estado seco e a massa em estado saturado, que corresponde à massa início no processo e secagem.

Em seguida, apresenta-se na Figura 41 os valores de índice de secagem para as amostras provenientes do Teatro Nacional São João.

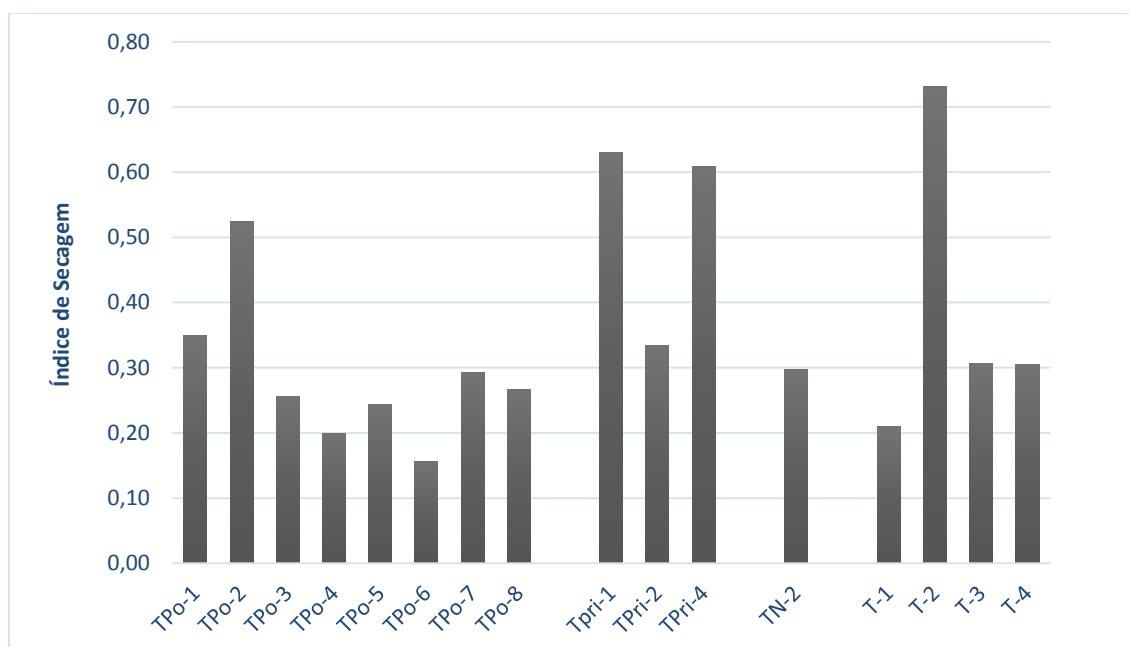


Figura 41- Índice de secagem - amostras do TNSJ

Relativamente ao Teatro Nacional São João as amostras apresentam vários índices de secagem, com valores compreendidos entre os 0,16 e 0,73. De modo geral, as amostras com maiores índices de secagem são as amostras com menores coeficientes de capilaridade, demonstrando uma relação inversamente proporcional. Quanto maior for a dificuldade de penetração da água, maior será a dificuldade em evaporar do seu interior. As amostras T-2, TPri-1 e TPO-2 destacam-se nesta relação pois são as argamassas com menores índices de capilaridade e maiores índices de secagem. Estas argamassas pertencem a elementos distintos das várias fachadas, a amostra TPri-1 corresponde a uma marcara (figura

masculina) e a amostra TPo-2 a uma e cornija, não se encontrando uma relação entre os vários elementos no que diz respeito à capacidade de secagem.

Estas características poderão ser influenciadas por um conjunto de fatores como a granulometria existente nas amostras, porosidade aberta ou mesmo o tipo de ligante. Sendo pertinente a análise complementar com recurso ao ensaio de porosimetria para auxiliar a compreensão do fenómeno.

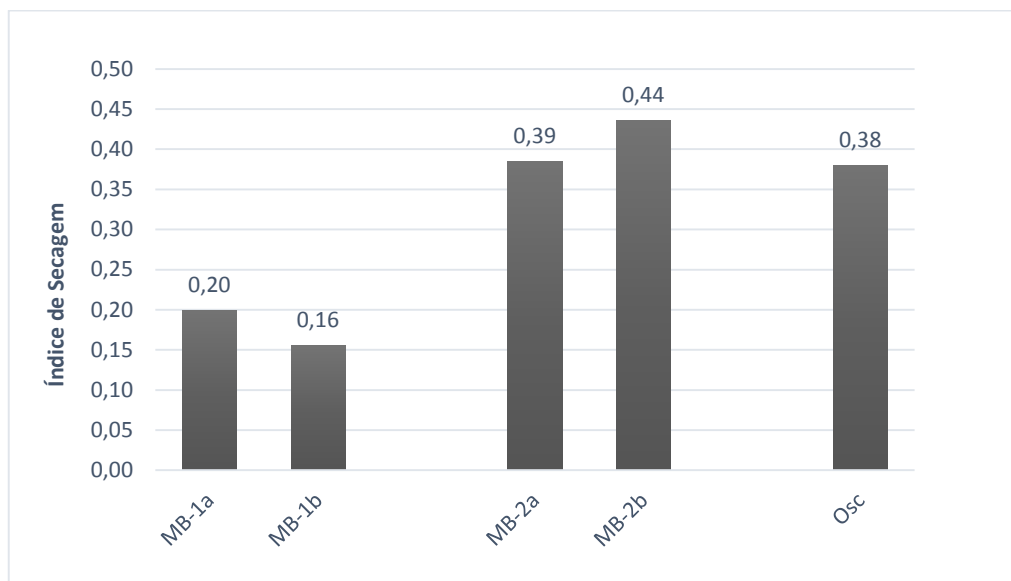


Figura 42- Índice de secagem - amostras Mercado do Bolhão e Palácio Oscarshall

Verifica-se neste ensaio que o índice de secagem é maior nas amostras MB-2a/b comparativamente às amostras MB-1a/b. No entanto terá sido um resultado pouco expectável, pois a amostra MB-1a/b apresentou no ensaio de absorção de água valores mas baixos comparativamente a MB-2a/b. Contudo, o lado da amostra MB-2a apresenta menor índice de secagem comparado com o lado do barramento, pois o lado da argamassa apresentou maior coeficiente de capilaridade comparativamente ao lado do barramento.

5.1.8. Análise qualitativa e semi-quantitativa de sais solúveis

Foram analisadas algumas amostras quanto ao comportamento de sais solúveis, como os sulfatos, cloretos, nitritos e nitratos. Esta análise foi efetuada segundo os procedimentos descrito em 4.1.2.8. A Tabela 15 sugere uma avaliação qualitativa da presença de sais a algumas amostras do Teatro Nacional São João e do Mercado do Bolhão.

Tabela 15 - Análise qualitativa de sais solúveis

Análise qualitativa						
Sais/Amostras	TPo-4	T-4	T-7	T-9	MB-1a	MB-2a
Sulfatos	++	+	+++	±	+	±
Cloretos	+	++	-	++	-	-
Nitritos	-	-	-	-	-	-
Nitratos	+++	±	+++	++	±	++

(+++ Presença de íões como componente principal para ± presença de íões no limite da perceptibilidade)

Relativamente ao comportamento das amostras à presença de sais, a formação de um precipitado de cor branca indicou a existência de sulfatos na solução, como podemos contatar na Figura 43a). A amostra T-7 obteve uma grande quantidade de íões SO_4^{2-} e seguidamente a amostra TPo-4 com uma quantidade apreciável. Surgem logo depois as amostras T-4 e MB-1a e por fim as amostras T-9 e MB-2a com presença de íões no limite da perceptibilidade.

No ensaio de análise aos cloretos, a formação de um precipitado de consistência gelatinosa e de cor branco-azulada manifesta a presença de íões Cl^- . Apenas a amostra T-4 apresentou estes íões em quantidade apreciável, já as amostras T-7, MB-1a e MB-2a não revelaram qualquer formação de precipitado, como se pode observar na Figura 43 b).

No que diz respeito ao ensaio da presença de nitritos, todas as amostras revelaram inexistência de íões NO_2^- . No entanto, as amostras TPo-4 e T-7 apresentam íões NO_3^- como componente principal após a mudança de cor para a tonalidade rosa. De seguida, as amostras MB-2a e T-9 com íões em quantidades consideráveis e por fim as amostras T-4 e MB-1a no limite do observável, como se pode observar na Figura 43 c).

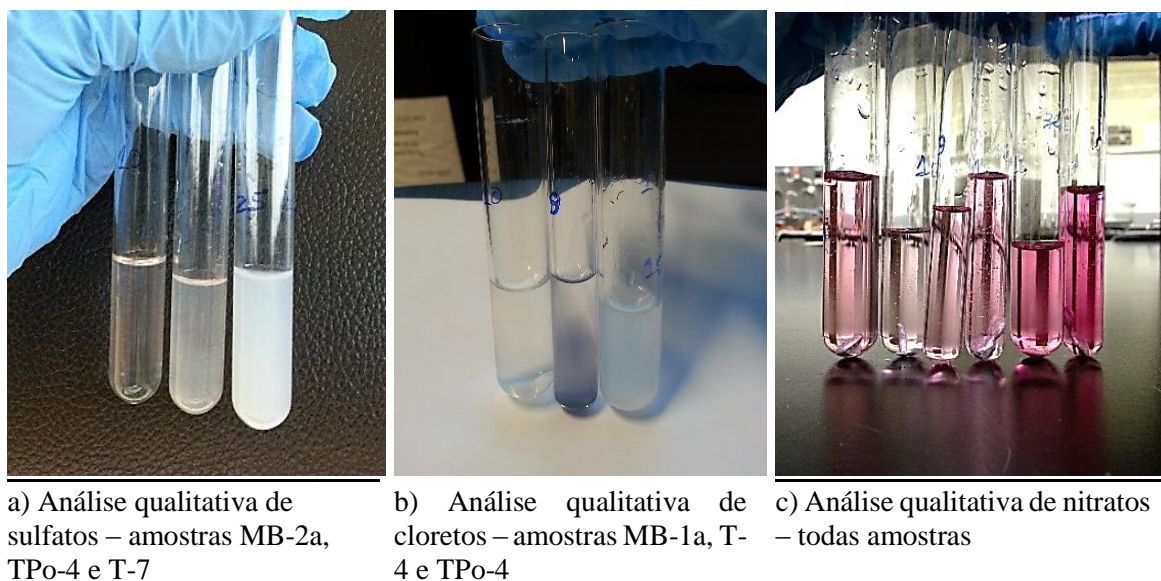


Figura 43 - Resultados análise quantitativa a sulfatos, cloretos e nitratos

Da mesma forma que o ensaio anterior, aproveitando a solução extraída de cada amostra, foram usados marcadores colorimétricos para a avaliação dos mesmos sais. A tabela seguinte sugere uma análise semi-quantitativa realizada após comparação com as várias escalas de cor indicadoras da quantidade de sais em mg/l.

Tabela 16- Análise semi-quantitativa de sais solúveis (mg/l)

Análise semi-quantitativa (mg /l)						
Sais/Amostras	TPo-4	T-4	T-7	T-9	MB-1a	MB-2a
Sulfatos	> 400	> 400	> 800	< 200	> 400	< 200
Cloretos	0 - 500	0 - 500	0 - 500	500	0 - 500	0
Nitritos	0 - 1	0	0	0	0	0 - 1
Nitratos	25	0	100	250	0	10 - 25

(limites para cada indicador colorimétrico; sulfatos - 200 a 1600 mg/l, cloretos – 500 a 3000 mg/l, nitritos – 1 a 80 mg/l e nitratos – 10 a 500 mg/l)

A amostra T-7 apresenta a maior quantidade de sulfatos com mais de 800 mg/l contrariamente às amostras T-9 e MB-2a com menos de 200 mg/l. Este resultado confirmar-se com o ensaio anterior onde a amostra T-7 também exibe a maior quantidade de iões SO_4^{2-} e a amostra MB-2a encontra-se no limite da perdetibilidade.

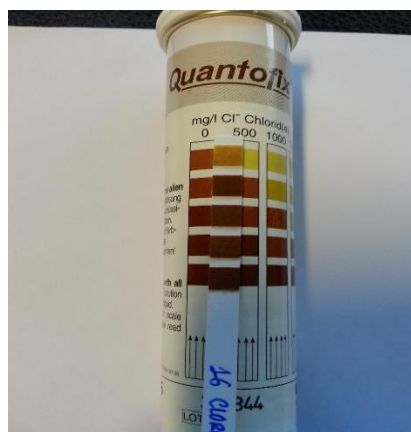
Estes resultados podem ser corroborados por análise do ensaio de DRX, possibilitando averiguar os compostos cristalinos existentes nas argamassas recolhidas. Entre as argamassas escolhidas para este estudo, a amostra T-7 apresenta as maiores quantidades de

gesso. O gesso é um mineral composto essencialmente por sulfato de cálcio comprometendo assim o aparecimento de maiores quantidades de iões SO_4^{2-} .

Na análise semi-quantitativa de cloretos a amostra T-9 encontra-se com cerca de 500 mg/l como se verifica também no ensaio anterior. No entanto na análise qualitativa, as amostras T-7 e MB-1a não demonstraram qualquer formação de precipitado gelatinoso branco/azulado, enquanto nesta análise surgem com valores entre os 0-500 mg/l.

De acordo com análise de DRX a estas amostras, verificou-se de igual modo que as amostras TPo-4, T-4 e T-7 apresentam vestígios de halite. A halite é um sal natural composto por iões de cloro, sendo por isso pertinente este resultado. A argamassa T-9 apresentou maior quantidade de cloretos neste ensaio, estando igualmente de acordo com os resultados obtidos por DRX. Em que esta amostra apresenta as maiores quantidades de halite de entre todas as argamassas. A presença de cloretos na amostra MB-1a difere do da análise de DRX, pois na análise mineralógica não foi encontrada presença de sais compostos com cloretos.

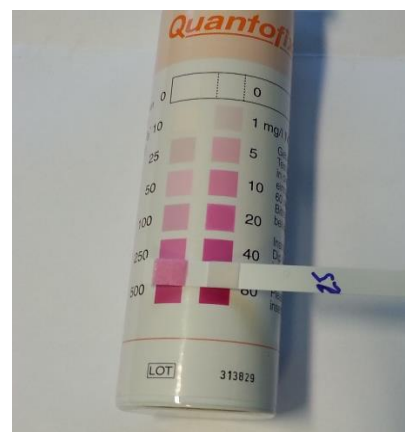
No ensaio relativo aos nitratos a amostra T-9 indica uma maior quantidade deste sal, na ordem dos 250 mg/l Figura 44 c), diferenciado da análise qualitativa que suscita maior porção nas amostras TPo-4 e T-7.



a) Indicador de cloretos



b) Indicador de sulfatos



c) Indicador de nitritos e nitratos

Figura 44 - Resultados dos indicadores colorimétricos

5.2. Análise global das argamassas antigas

Com os ensaios realizados pretendeu-se a caracterização, o mais completa possível, das argamassas recolhidas nos edifícios em estudo. Esta análise é possível considerando e conjugando os resultados obtidos de todos os ensaios, permitindo assim, a distinção entre as diversas argamassas.

Após caracterização de várias amostras retiradas das fachadas do Teatro Nacional de São João, verifica-se que a análise por DRX e FRX aponta a utilização de ligante hidráulico em todas as argamassas, apenas com exceção da amostra T-7, composta essencialmente por gesso.

As argamassas apresentam como componentes principais óxido de cálcio e sílica em maiores percentagens. A presença de componentes hidráulicos deve-se à presença de compostos argilosos como o óxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro com percentagens bastante consideráveis.

De um modo geral, pela análise de DRX, as argamassas apresentam calcite e quartzo em todas as amostras. Contudo, as argamassas revelam processos de dissolução – recristalização devido a presença de minerais como a aragonite e vaterite encontradas. Ainda de modo expressivo, são detetados silicatos, nomeadamente filossilicatos, feldspatos potássicos, plagióclases e piroxenas. A larnite é detetada em algumas amostras pois trata-se do silicato bicálcico, sendo um composto presente em qualquer ligante hidráulico, como cal hidráulica ou cimento.

A presença de sais como a nahcolite e halite é generalizada entre as argamassas, podendo ter origem tanto nos agregados como a influencia do ambiente salino a que o edifício está exposto, por se encontrar junto a uma zona costeira.

Verifica-se também a existência de transformações químicas nas argamassas com algum grau de alteração devido à presença de gesso, nahcolite e caulinite.

Conclui-se que a análise por DRX e análise aos sais solúveis é bastante coerente, pois os resultados qualitativos e semi-quantitativos revelam presença de sulfatos, cloretos e nitratos como encontrado no ensaio de DRX.

Como observado na análise visual as argamassas, estas apresentavam algumas zonas contaminadas por oxidação do ferro, o que irá de encontro à análise de DRX detetando a presença de pirite.

Conforme é possível verificar na Tabela 17, a resistência das argamassas analisadas apresenta alguma variabilidade. A amostra com maior resistência corresponde a um elemento decorativo pertencente à fachada poente e as amostras com baixa resistência a amostras retiradas das máscaras, neste caso figura masculina.

Tabela 17 - Resistência à compressão máxima, mínima e média

Resistência à compressão		
Máxima	Mínima	Média
34,81 MPa	10,54 MPa	21,21 MPa

De modo geral, analisando também os ensaios de dissolução ácida, verifica-se que as amostras com maior quantidade de finos apresentam maiores resistências à compressão. Neste sentido, seria de interesse a realização de ensaios complementares, como a porosimetria.

Nesta gama de amostras, exclui-se a amostra T-7 por apresentar outro tipo de ligante, gesso, baixando assim a sua resistência mecânica. Verificou-se ainda que apresenta um traço fraco em ligante (1:10,6), contribuindo para os fracos resultados.

O ensaio por dissolução ácida sugere que as amostras apresentam quantidades variáveis de ligante, com traços predominantes e aproximados na ordem do 1:2 e 1:3.

O comportamento capilar das diversas argamassas analisadas revelam coeficientes de capilaridade e índices de secagem variados, como se pode verificar na Tabela 18.

As argamassas com maiores coeficientes de capilaridade apresentam os menores índices de secagem, verificando-se assim, que estes parâmetros são inversamente proporcionais. Uma argamassa com maior facilidade de penetração de água também irá secar mais facilmente.

Tabela 18 - Coeficientes de capilaridade e índice de secagem máximos, mínimos e médios

	Coeficiente de capilaridade (Kg/m ² .min ^{0,5})	Índice de secagem
Máximo	0,460	0,73
Mínimo	0,022	0,16
Médio	0,135	0,36

Verifica-se a utilização de agregado silicioso em todas as amostras, contudo observa-se uma grande variabilidade de curvas granulométricas. De modo geral, as argamassas provenientes do Teatro Nacional São João apresentam uma dimensão máxima de agregado entre 4mm e 2mm. Na sua maioria, as amostras são constituídas por um fuso granulométrico predominante de material retido entre os 0,5mm e 0,25mm.

Do ensaio de granulometria observa-se que as amostras apresentam diferentes colorações, sugerindo origens distintas e possíveis reparações.

Na análise às amostras provenientes do Mercado do Bolhão, verificou-se que apresentam uma granulometria muito similar entre si, indicando que a maior percentagem de agregado retido encontra-se centrado entre os peneiros de 1,0mm e 0,5mm.

As amostras analisada por DRX, apresentam grande teor em calcite e quartzo como componentes mais abundantes e em ambas foi possível detetar gesso na sua composição. Na argamassa MB-2a verifica-se a presença de outras formas de carbonato de cálcio como a vaterite e ainda detetou-se caulinite, sugerindo uma maior degradação nesta amostra. Foi ainda encontrada a presença de larnite, como descrito anteriormente, sugerindo a utilização de um ligante hidráulico nas argamassas.

Relativamente à sua caracterização mecânica e física, nomeadamente a resistência à compressão e absorção de água por capilaridade verificou que as amostras do Mercado do Bolhão apresentam uma resistência média de 3,84MPa, sendo a amostra MB-2a que apresenta menor valor. Este resultado poderá advir do facto desta amostra apresentar um traço mais fraco em ligante, resultado obtido da dissolução ácida, e ainda, apresentar alguma degradação como observado na análise de DRX. Verifica-se também que esta amostra apresenta maior valor de coeficiente de capilaridade.

Na análise da amostra proveniente do Palácio Oscarshall, verifica-se igualmente a existência de compostos hidráulicos na sua formulação. Esta amostra apresenta componentes de elevada ordem cimentícia comparativamente as restantes amostras em estudo no presente trabalho, como a wollastonite e a etringite. Estes minerais apresentam-se nos produtos principais da hidratação do cimento e da cal hidráulica, nos silicatos de cálcio hidratados. No entanto a Wollastonite, usualmente conhecida por alite, apenas se forma na cal hidráulica

em frações pequenas, pois esta é formada a altas temperaturas, sendo o composto principal dos cimentos.

Relativamente ao comportamento mecânico, esta última amostra apresenta aproximadamente 26,58MPa, estando numa ordem de valor idêntico às amostras do Teatro Nacional São João.

5.3. Análise de argamassas de substituição

Neste terceiro subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios descritos anteriormente, após a formulação e execução de novas argamassas. Com esta análise pretende-se averiguar a viabilidade das argamassas para reabilitação de edifícios antigos.

5.3.1. Caracterização dos materiais

5.3.1.1. Análise Visual

Os materiais utilizados apresentam uma gama de cores variada, as tonalidades variam desde o branco ao cinzento escuro, o branco corresponde à cal aérea, enquanto o cinzento escuro ao cimento Portland. A cal hidráulica NHL 3,5 e o cimento natural Vicat apresentam tons entre o cinzento claro e o castanho, respetivamente.

5.3.1.2. Massa volúmica aparente

Na Tabela 19 é apresentada a massa volúmica aparente de cada componente constituinte das novas argamassas.

Tabela 19 Massa volúmica aparente dos materiais utilizados

Material	Massa Volúmica Aparente (Kg /m ³)
Cal aérea	384,52
NHL 3,5	714,42
Cimento natural Vicat	791,15
CEM I	1073,03
Areia	1521,25

Determinadas as massas volúmicas aparentes dos diversos materiais, verifica-se que a cal aérea H100 tem a menor massa volúmica. De seguida, com valores muito idênticos, aparecem a cal hidráulica NHL 3,5 e o cimento natural Vicat. Por fim o cimento Portland de classe I e a areia de rio siliciosa apresentam as maiores massas volúmicas.

5.3.1.3. Análise mineralógica de NHL 3,5 e cimento Vicat – DRX

Nas Figuras 45 e 46 apresentam-se os resultados obtidos da análise mineralógica de dois dos ligantes (cal hidráulica natural e cimento natural) utilizados na realização das novas argamassas. Os difractogramas relativos à análise dos ligantes, revelam que têm composições similares, verifica-se a presença de Larnite, Quartzo, Calcite, Moscovite e Portlandite em ambos os ligantes.

A formação de ligantes hidráulicos resulta da decomposição da argila em silicatos e aluminatos combinados com óxido de cálcio. Esta reação dá origem a uma mistura de silicatos e aluminatos de cálcio e ainda uma grande percentagem de cal viva. Na cal hidráulica dá-se a formação de silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), sendo a fase proeminente neste tipo de cal. A larnite é um silicato bicálcico usualmente conhecido por belite, sendo um dos compostos resultantes da análise química da cal hidráulica NHL3,5. No entanto na análise por DRX do cimento natural Vicat é possível verificar a existência do mesmo composto, pois este também se encontra presente nos cimentos. Segundo a Belite é um composto que se encontra na constituição de cimentos antigos e na qual também se pode formar a partir do arrefecimento lento do silicato tricálcico, alite, componente metaestável presente na constituição do cimento (Rodrigues,2004).

A portlandite é usualmente conhecida por hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), proveniente da reação de extinção da cal viva por hidratação. Esta reação é necessária pois a cal hidráulica necessita de ser extinta após ser cozida, no entanto nos cimentos não é necessária esta extinção. Analisando os resultados de DRX verifica-se que a portlandite encontra-se mais abundantemente na cal hidráulica NHL do que no cimento natural Vicat.

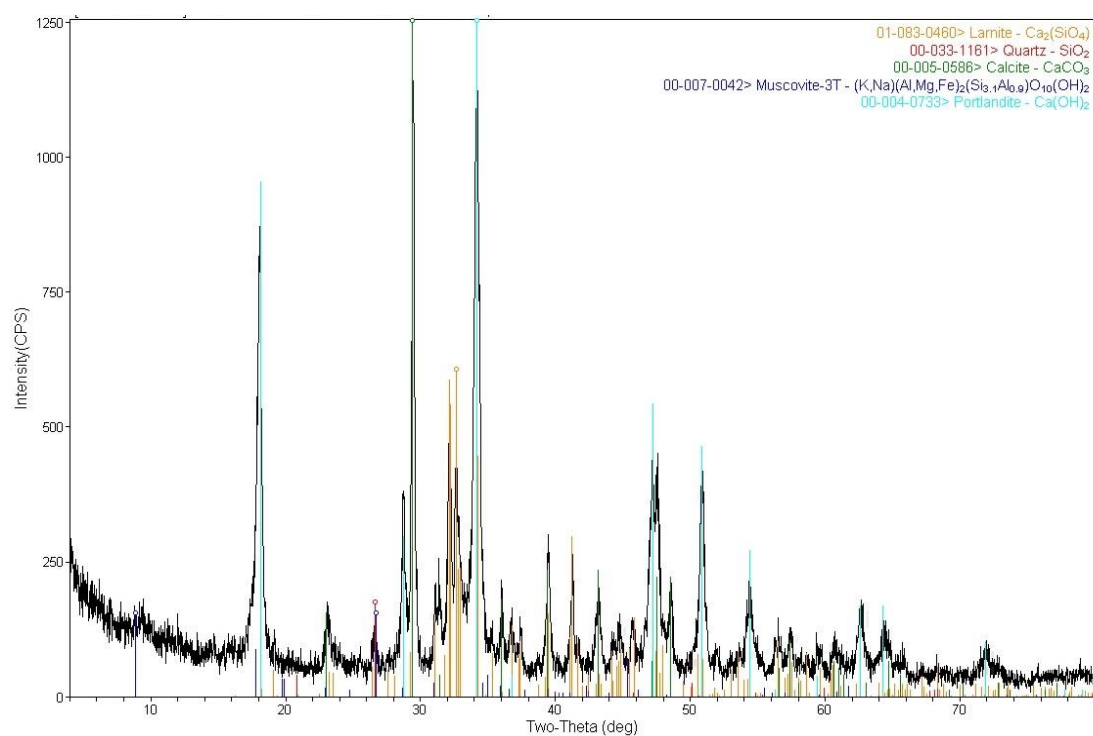


Figura 45-Análise mineralógica por DRX para a cal hidráulica NHL3,5

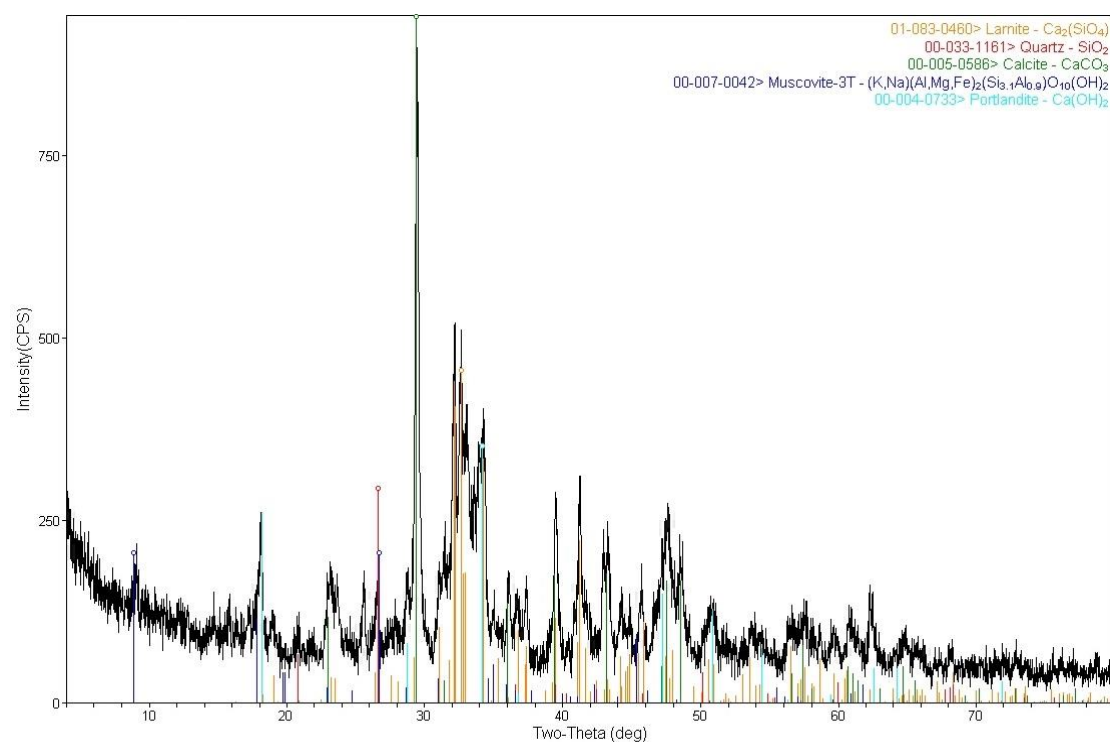


Figura 46-Análise mineralógica por DRX para o cimento natural Vicat

5.3.1.4. Granulometria agregado

A areia de rio siliciosa utilizada na composição das novas argamassas possuía uma pequena quantidade de agregados com dimensão superior a 4 mm. Assim sendo foi necessário submetê-la a uma peneiração, pois na formulação de argamassas de reparação é necessário analisar o tipo de agregado existente nas argamassas antigas. Obtendo-se a seguinte curva granulométrica.

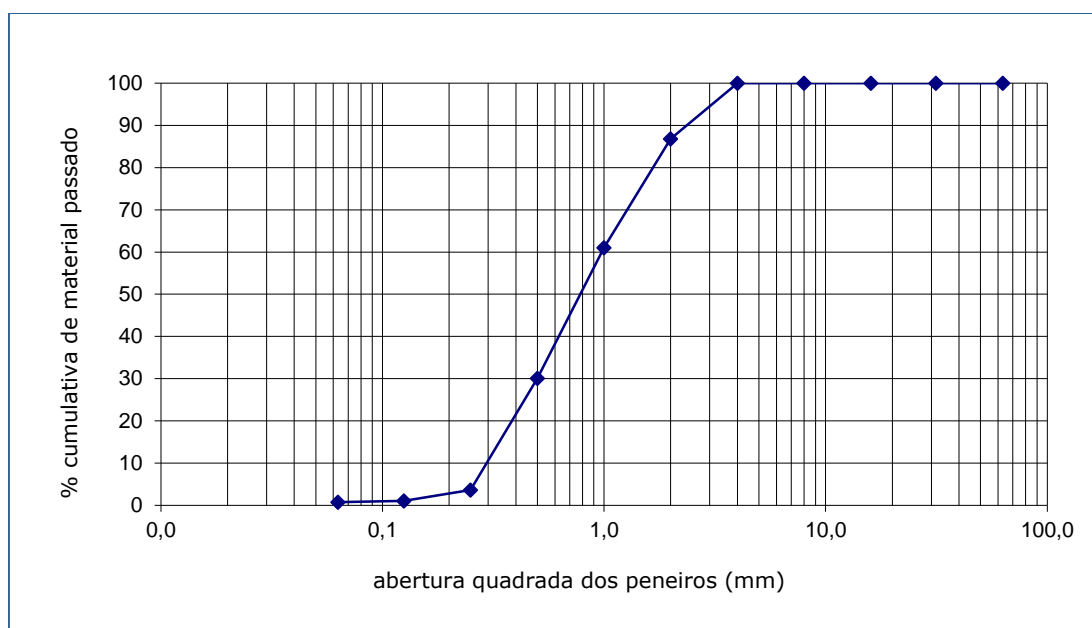


Figura 47- Curva granulométrica areia de rio

5.3.2. Ensaios realizados às argamassas substituição

5.3.2.1. Análise da absorção da água por capilaridade

Como referido anteriormente, este ensaio permite determinar um parâmetro de essencial ao comportamento de argamassas. A análise da absorção da água por capilaridade foi realizada segundo o descrito no subcapítulo 4.2.4.7.

Na Figura 48 apresentam-se os valores do coeficiente de capilaridade obtidos para os processos de cura C2 (20°C / 65% HR – 28 dias) e C3 (20°C / 95% HR – 28 dias) para as formulações realizadas.

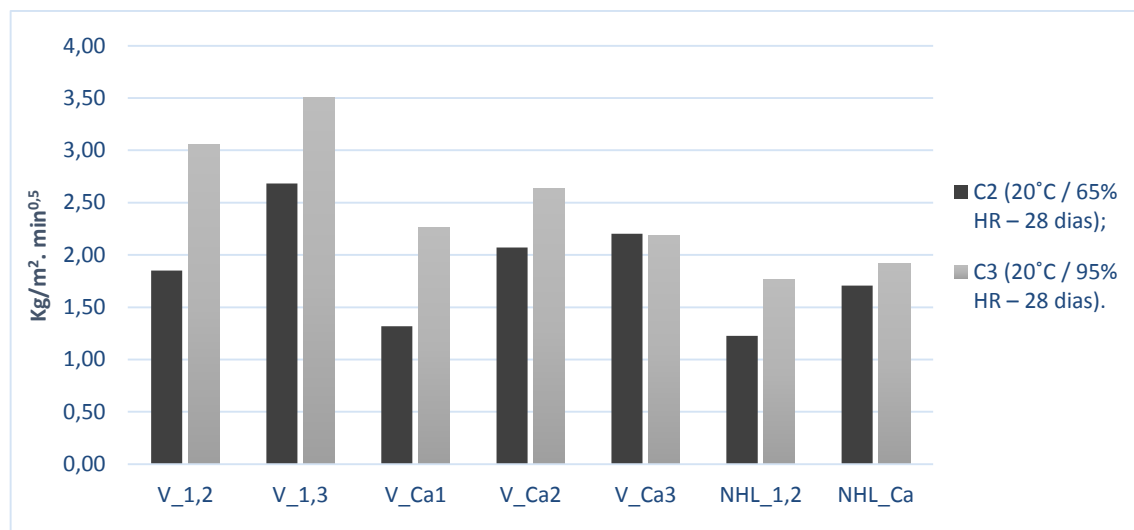


Figura 48-Resultados dos coeficientes de capilaridade para as formulações realizadas

Em termos do coeficiente de capilaridade, pelo que traduz a velocidade com que se desenvolve a absorção capilar nos primeiros instantes de contacto com a água, verifica-se a ocorrência de valores mais elevados nas argamassas compostas por cimento natural e menores valores nas argamassas compostas com cal hidráulica natural. Esta diferença é particularmente visível no caso da formulação V_1,2 comparativamente à amostra NHL_1,2, ambas com o mesmo traço. Do mesmo modo, a argamassa V_Ca2 também apresenta maior valor comparativamente à formulação NHL_Ca.

De modo geral, verifica-se que as argamassas bastardas de cimento natural e cal aérea obtêm maiores valores de coeficiente de capilaridade nas formulações com traços mais ricos em cal aérea, apresentando a mesma analogia para os dois tipos de cura. De igual modo, as formulações compostas de cal hidráulica natural e bastarda, NHL_1,2 e NHL_Ca, apresentam a mesma relação. No entanto estes valores poderão também ser influenciados pela quantidade de agregado que compõem as argamassas, verificando-se que as amostras com maior quantidade de areia apresentam também maiores valores de coeficiente de capilaridade nos dois tipos de cura.

Relativamente às amostras V_1,2 e V_1,3 constata-se que a amostra V_1,3 apresenta maior capacidade de absorver água, este resultado poderá dever-se ao facto desta amostra apresentar um traço mais fraco, ou seja, maior quantidade de agregado e por isso maior facilidade em absorver água.

Destaca-se ainda, que as formulações realizadas com um condicionamento húmido (C3) apresentam maiores valores de coeficiente de capilaridade comparativamente às formulações realizadas em condicionamento seco (C2). Apenas a amostra V_Ca3 apresenta valores idênticos entre os diferentes processos de cura. Este fato pode ser imputável às diferenças geradas na estrutura porosa e a sua explicação deve ser baseada em ensaios complementares de porosimetria de mercúrio.

Na análise dos resultados obtidos, constata-se que o coeficiente de capilaridade mínimo é de $1,23 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e o máximo de $2,68 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, para formulações realizadas com uma cura seca C2. Nas argamassas realizadas em processo de cura C3, apresentam um coeficiente de capilaridade mínimo de $1,76 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e máximo de $3,50 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$.

5.3.2.2. Análise de índice de secagem

Na Figura 49 apresentam-se os resultados dos índices de secagem das formulações executadas relativos ao processo de cura seco (C2) e húmido (C3).

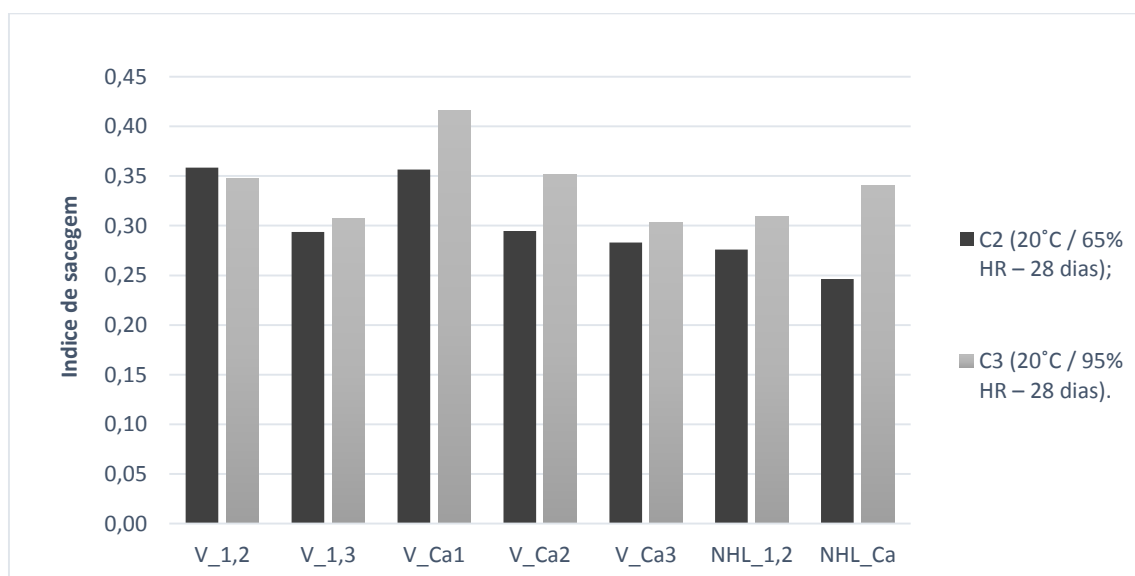


Figura 49- Resultados do índice de secagem para as formulações realizadas

De modo geral, verifica-se que as argamassas de substituição formuladas apresentam valores de índice de secagem muito idênticos entre si, independentemente dos diferentes condicionamentos. No entanto, poderá destacar-se a amostra V_Ca1 que apresenta maiores

índices de secagem relativamente aos dois processos de cura. Sugerindo assim, uma maior capacidade em eliminar a água do seu interior.

5.3.2.3. Análise de resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão, R_f , adquire um propósito devido à solicitação transversal à qual uma argamassa de revestimento está sujeita. Na Tabela 20 indicam-se as formulações realizadas e a média dos valores obtidos no decorrer deste ensaio, ao final de 28 dias, com o respetivo desvio padrão.

Tabela 20- Médias e desvio padrão da resistência à flexão das diferentes formulações

Designação	Composição em volume	C1		C2		C3	
		Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
V_1,2	1:2	0,22	0,03	0,16	0,05	0,90	0,05
V_1,3	1:3	0,16	0,00	0,14	0,01	0,57	0,05
V_Ca1	1,5:0,5:4	0,50	0,02	0,52	0,05	1,19	0,07
V_Ca2	1:1:4	0,36	0,01	0,56	0,04	0,75	0,06
V_Ca3	1:2:6	0,26	0,01	0,26	0,03	0,46	0,03
NHL_1,2	1:2	0,86	0,02	0,84	0,06	1,45	0,11
NHL_Ca	1:1:4	0,34	0,03	0,37	0,03	0,70	0,06
C_1,2	1:2	6,77	0,39	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
C_Ca	1:1:4	4,37	0,19	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.

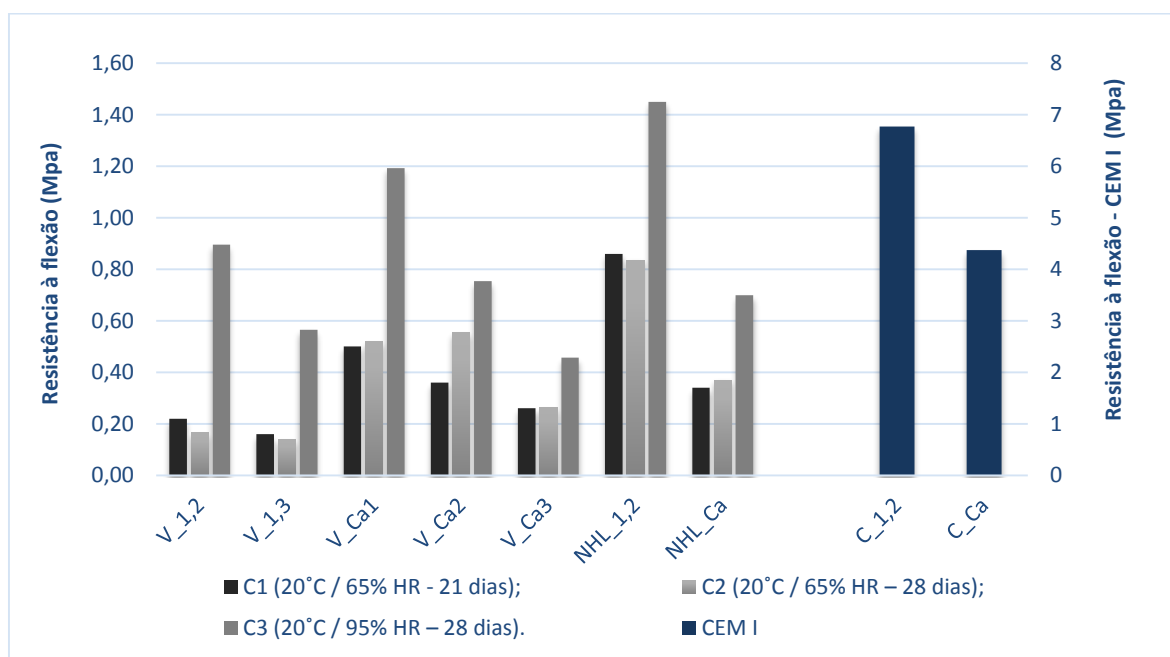


Figura 50- Resultados da resistência à flexão das formulações realizadas

Como foi descrito anteriormente no subcapítulo 4.2.3, o condicionamento C1 difere do condicionamento C2 apenas nos primeiros 7 dias de cura das argamassas, em que se registou uma humidade aproximada de 83%. O condicionamento C1 refere-se aos provetes colocados 21 dias numa câmara a 20° C e 65% HR e no condicionamento C2 os provetes foram colocados 28 dias. O condicionamento C3 realizou-se aos provetes executados em cura húmida, colocados durante 28 dias numa câmara a 20° C e 95% HR.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os provetes com condicionamento C1 e C2 obtiveram valores de resistência à flexão muito semelhantes entre formulação. A amostra V_Ca2 é a única que apresenta uma maior variação de resultados entre o condicionamento C1 e C2. Este resultado poderá dever-se ao facto da amostra V_Ca2 apresentar um traço mais rico em cal aérea, na qual é previsível um ganho de resistência num condicionamento de cura mais seco, favorecendo a carbonatação como é o caso de C2. Ainda se verifica que da mesma forma que amostra V_Ca2, as restantes argamassas com condicionamento de cura C2 e em que a sua composição seja constituída por cal aérea apresentam um ligeiro incremento da resistência.

Ao contrário destas argamassas bastardas, compostas com cal aérea, os provetes com traços compostos unicamente com ligante hidráulico apresentam ligeiro incremento de resistência no condicionamento de cura C1 comparativamente ao C2. Tal poderá resultar do facto do condicionamento C1 apresentar nos primeiros 7 dias humidade relativa superior a 65%. Poderá observar-se este pressuposto nas amostras V_1,2 , V_1,3 e NHL_1,2.

Como se pode observar na Figura 50, relativamente à condição de cura C2, nas argamassas em que foi incorporado cimento natural Vicat com cal aérea, verifica-se um incremento da resistência à flexão. Este comportamento poderá resultar do facto das argamassas com cal aérea realizadas em cura seca carbonatarem mais facilmente. As argamassas que melhor comprovam este desempenho são as amostras V_Ca1 e V_Ca2.

Relativamente ao condicionamento de cura húmido, C3, as formulações V_1,2 e V_1,3 apresentam uma grande discrepância de resultados quando comparadas com os outros condicionamentos. As amostras V_1,2 e V_Ca1 apresentam maiores resultados de resistência à flexão visto serem mais ricas em componente hidráulica, sendo que o ambiente húmido facultado pela câmara de 95% HR irá proporcionar uma melhor hidratação dos compostos hidráulicos. Por outro lado a amostra V_Ca3 com maior quantidade de cal aérea

tem uma resistência mais baixa pois a difusão do dióxido de carbono na água é muito mais lenta que no ar, pois estando o material saturado em água a carbonatação é retardada.

No condicionamento de cura húmido, C3, relativamente às formulações incorporadas com NHL3,5, como seria de esperar a amostra NHL_1,2 obteve maior resistência em comparação com amostra NHL_Ca pois a primeira apresenta um traço mais forte em ligante hidráulico.

No entanto, os resultados de argamassas compostas com cimento natural e cal hidráulica natural sugerem resultados inesperados. Pois verifica-se, em geral, que a cal hidráulica obtém maiores valores de resistência à flexão comparativamente com o cimento natural Vicat, apresentando valores baixos de resistência.

Os resultados da resistência à flexão das argamassas compostas com CEM I apresentam incrementos de resistência bastante elevados comparativamente às restantes formulações, sugerindo não ser portanto adequados ao objetivo do trabalho.

5.3.2.4. Análise resistência à compressão

À semelhança do ensaio anterior, na Tabela 21 apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão, em argamassas com 28 dias com os diferentes condicionamentos de cura.

Tabela 21- Médias e desvio padrão da resistência à compressão das diferentes formulações

Designação	Composição em volume	C1		C2		C3	
		Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
V_1,2	1:2	0,61	0,03	0,53	0,02	1,69	0,06
V_1,3	1:3	0,41	0,03	0,31	0,01	0,97	0,06
V_Ca1	1,5:0,5:4	2,23	0,08	1,82	0,07	2,47	0,01
V_Ca2	1:1:4	1,10	0,01	1,55	0,04	1,35	0,10
V_Ca3	1:2:6	0,69	0,06	0,77	0,03	0,82	0,06
NHL_1,2	1:2	2,4	0,10	2,34	0,07	2,76	0,05
NHL_Ca	1:1:4	1,00	0,02	1,00	0,02	1,26	0,03
C_1,2	1:2	27,97	1,41	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.

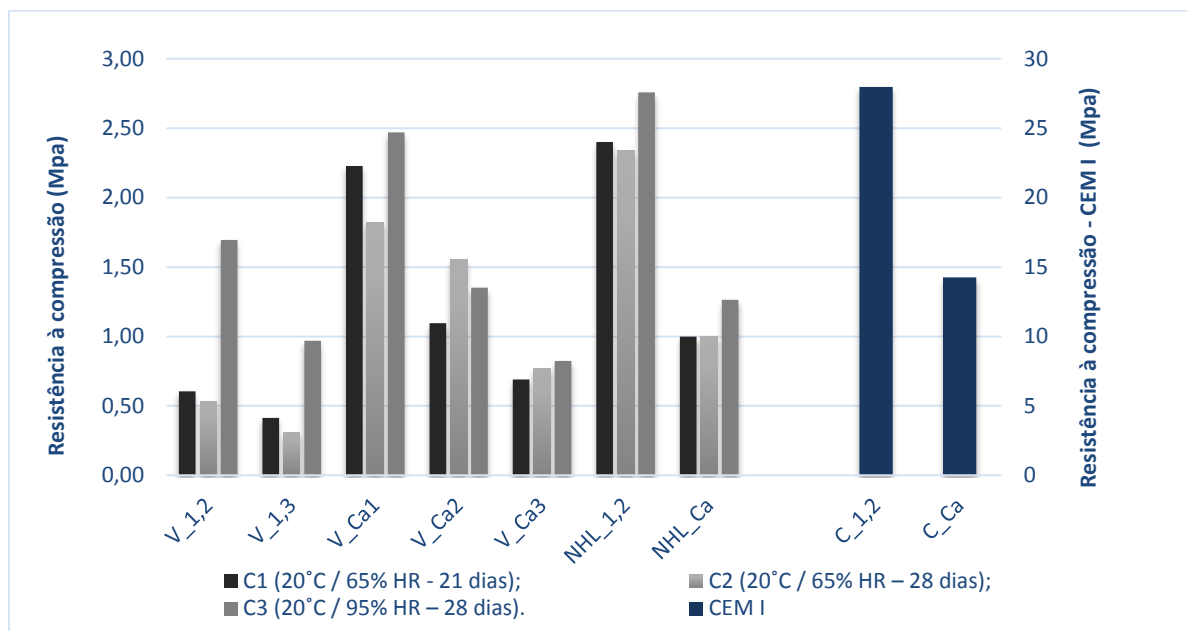


Figura 51-Resultados da resistência à compressão das formulações realizadas

Relativamente ao condicionamento de cura húmido, C3, verifica-se que as amostras formuladas com traços mais fortes em cimento natural Vicat apresentam maiores valores de resistência à compressão. São exemplos as amostras V_Ca1 e V_1,2, contrariamente, a amostra V_Ca3 que apresenta o menor valor de resistência, visto conter um traço mais fraco.

No condicionamento C2, nas argamassas compostas com cimento natural e cal aérea verificam-se maiores resistências à compressão neste tipo de condicionamento seco. À semelhança do ensaio de resistência à flexão as amostras compostas com cal aérea atingem maiores valores de resistência por este tipo de cura ser mais favorável a argamassas que incorporam este ligante.

Da mesma forma que o ensaio anterior, as amostras V_1,3 e V_Ca3 indicam o mesmo tipo de comportamento. Apresentando valores de resistência mais baixos comparativamente às outras formulações.

Analogamente ao ensaio de resistência à flexão, as amostras compostas com cimento natural sugerem resultados inesperados por apresentarem novamente valores mais baixos que as argamassas compostas com cal hidráulica.

Nos provetes compostos com NHL3,5 observa-se um conjunto de resultados idênticos ao conjunto das argamassas compostas com cal hidráulica. Apresentam no condicionamento C1 e C3 maior resistência na amostra NHL_1,2 comparativamente à amostra NHL_Ca,

justificando assim o incremento de resistência devido à presença de ligante hidráulico ao ambiente húmido. No entanto seria de esperar que a amostra NHL_Ca sujeita ao tipo de cura C2 apresentasse maior resistência à compressão por ser composta por cal aérea.

5.3.2.5. Análise profundidade de carbonatação

O ensaio de profundidade de carbonatação avalia a extensão das zonas em que a solução de fenolftaleína em contacto com uma superfície alcalina muda de cor. Esta reação de carbonatação procede de fora para dentro, visto que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) tem de entrar em contacto com o dióxido de carbono da atmosfera para carbonatar. Deste modo, forma-se o carbonato de cálcio (CaCO_3), que em contacto com a fenolftaleína é insolúvel. A alteração de cor da fenolftaleína dá-se na presença do hidróxido de cálcio, ou seja, cal não carbonatada.

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados obtidos da profundidade de carbonatação em milímetros das diversas formulações e condicionamentos de cura.

Tabela 22 - Resultados profundidade de carbonatação

Designação	Composição em volume	C1	C2	C3
		Média (mm)	Média (mm)	Média (mm)
V_1,2	1:2	12,60	14,00	3,40
V_1,3	1:3	17,30	16,25	4,80
V_Ca1	1,5:0,5:4	4,70	7,00	2,45
V_Ca2	1:1:4	3,60	5,70	2,20
V_Ca3	1:2:6	3,40	4,35	2,30
NHL_1,2	1:2	2,20	3,35	2,00
NHL_Ca	1:1:4	2,75	4,40	1,30

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as argamassas com um condicionamento de cura húmido, C3, apresentam sempre uma menor profundidade de carbonatação em todas as formulações, o condicionamento C1 apresenta maior profundidade de carbonatação que C3, surgindo o condicionamento C2 com maior área carbonatada. Este comportamento seria expectável pois o condicionamento C2 representa a cura mais seca e por isso propícia à carbonatação. A difusão do dióxido de carbono necessário à carbonatação numa argamassa húmida é muito mais lenta que no ar, retardando a carbonatação em amostras saturadas em

água. No entanto, a amostra V_1,3 torna-se exceção ao apresentar menor profundidade de carbonatação no condicionamento C2 do que no condicionamento C1.

Verifica-se que todas as argamassas compostas por NHL3,5, independentemente do tipo de cura e de traço, apresentam-se menos carbonatadas que as amostras compostas com cimento natural.

Constata-se que formulações com ligante hidráulico e cal aérea apresentam-se menos carbonatadas do que formulações compostas só com ligante hidráulico. Este comportamento pode dever-se à libertação de água resultante na reação de carbonatação podendo favorecer a hidratação do componente hidráulico.



a) Diferentes amostras com processo de cura C2 e C3

b) Amostra V_1,2 – lado direito (65% HR), lado esquerdo (95% HR)

Figura 52- Profundidade de carbonatação

5.3.2.6. Análise do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico, E_d , traduz a rigidez de uma argamassa, permitindo aferir a sua deformabilidade. Quanto mais rígida for a argamassa, maiores serão os valores resultantes do ensaio do módulo de elasticidade, e menos deformável será.

Na Figura 53 são apresentados os resultados obtidos pelo ensaio do módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com 28 dias e com os diferentes tipos de cura.

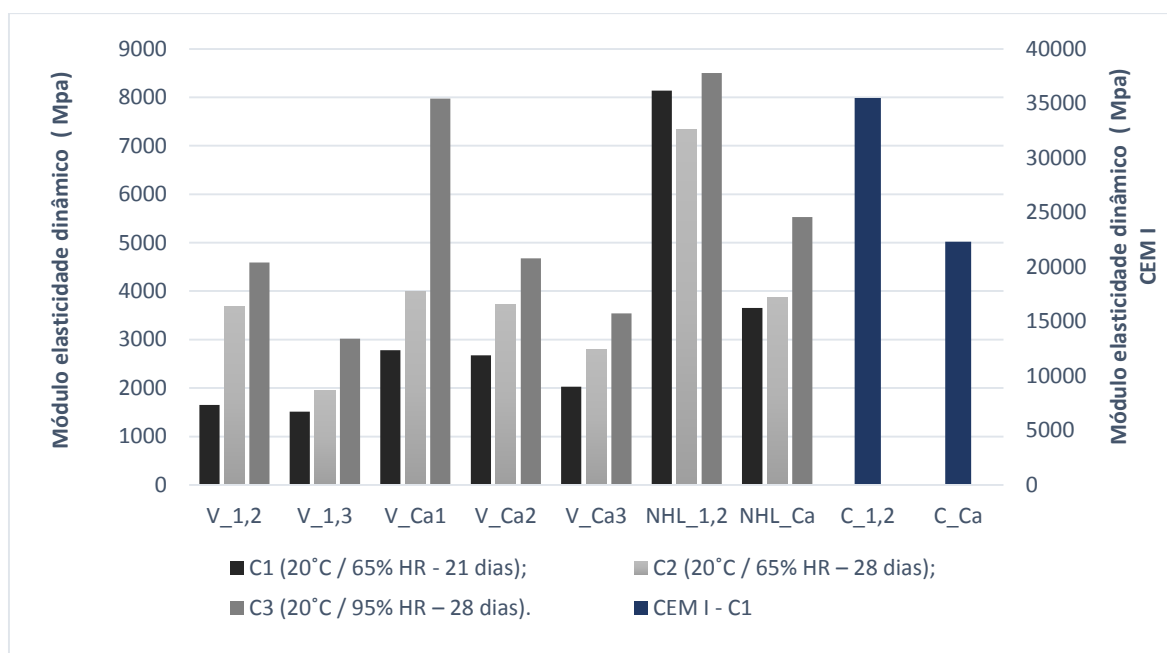


Figura 53 - Módulo de elasticidade dinâmico das formulações

Para a condição de cura C1, os valores do módulo de elasticidade encontram-se entre os 1511MPa e os 8136MPa. O condicionamento de cura C2 apresenta maior discrepância de resultados, tomando valores de módulo de elasticidade entre os 1942MPa e 7336MPa. Ligeiramente maior é a ordem de grandeza das amostras na condição de cura C3, na qual os valores variam entre os 3019MPa e os 8501MPa.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as argamassas sujeitas a uma cura húmida diferenciam-se das restantes na medida que apresentam maiores valores de módulo de elasticidade.

De um modo geral, os resultados sugerem que argamassas com traços mais fortes em ligante apresentam maior rigidez. É exemplo a amostra V_1,2 comparativamente à formulação V_1,3, onde se verifica que em qualquer condição de cura a amostra V_1,2 obtém sempre maior valor de módulo de elasticidade. Do mesmo modo, as argamassas bastardas de cimento natural e cal apresentam a mesma relação, sendo a formulação V_Ca1 a conter o traço mais forte e a apresentar os maiores valores em todos os processos de cura. Ainda neste contexto, as argamassas com cal hidráulica apresentam em geral a mesma relação, no entanto a formulação NHL_1,2 apresenta um maior módulo de elasticidade no processo de cura C1 do que no processo de cura C2.

Destaca-se ainda que argamassas com traços idênticos apresentam módulos de elasticidade semelhantes com cura seca C2, independentemente dos ligantes usados. Este facto é particularmente visível comparando as amostras que contêm traços 1:2 como V_1,2, V_Ca2 e NHL_1,2. Contudo, nas formulações realizadas em cura húmida, C3, esta relação é mais visível entre as argamassas V_1,3 e V_Ca3 e entre as formulações V_1,2, V_Ca2 e NHL_Ca. As argamassas C_1,2 e C_Ca, à base de CEM I apresentam valores muito elevados comparativamente às outras formulações, verificando-se assim que este tipo de ligante provoca um grande incremento na rigidez das amostras.

5.4. Análise global das argamassas de substituição

As formulações e os ensaios realizados tiveram como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de argamassas de substituição passíveis de serem compatíveis com o património edificado antigo.

Relativamente ao comportamento das argamassas formuladas quanto à absorção de água, verificou-se em geral, que as amostras incorporadas com cimento natural e cal área obtiveram maiores valores de coeficiente de capilaridade nas amostras com traços mais ricos em cal aérea. Constatou-se ainda, que formulações realizadas em condicionamento húmido apresentam pior desempenho, obtendo coeficientes de capilaridade maiores relativamente ao condicionamento mais seco.

No entanto, os resultados do comportamento mecânico, apresentam em geral maiores valores de resistência à compressão e à flexão nas argamassas sujeitas ao condicionamento húmido. Verificando-se que as amostras compostas unicamente por cimento natural e areia obtêm valores baixos em qualquer condicionamento de cura.

Verificou-se que argamassas compostas com cimento Portland apresentam incrementos de resistência muito elevados, não sendo adequados para argamassas de substituição de edifícios antigos.

No que diz respeito à rigidez das argamassas realizadas, verificou-se que as argamassas condicionadas a uma cura húmida apresentam maiores resultados de módulo de elasticidade, assim como formulações com traços mais ricos em ligante, sugerindo ser menos

deformáveis. Este resultado poderá ser desfavorável relativamente à função que uma argamassa de revestimento deve conter, podendo apresentar assim maior fissuração.

Destaca-se a formulação V_Ca1, que em geral, apresenta melhores desempenhos relativamente às restantes argamassas. Esta formulação apresenta assim, menor coeficiente de capilaridade e maior índice de secagem. Possibilitando maior dificuldade na intrusão de água no seu interior, e permitindo uma maior secagem. Relativamente ao seu desempenho mecânico, apresenta bons resultados no condicionamento de cura seco como no húmido.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido teve como principal objetivo a caracterização de revestimentos antigos pertencentes a edifícios construídos entre o final do século XIX e o início do século XX.

Com este estudo pretendeu-se contribuir para a valorização do património edificado, fator importante para os sectores da conservação e do restauro.

Foram escolhidos edifícios representativos dessa época para a realização desse estudo. Os ensaios de caracterização química e mineralógica, assim como de caracterização física e mecânica, tornam-se essenciais quando se pretende a identificação de argamassas originais. Verificou-se assim que as argamassas dos edifícios em estudo apresentaram características semelhantes ao nível dos seus revestimentos exteriores. Durante a análise das argamassas antigas foi possível observar a tendência generalizada para o uso de argamassas compostas por ligantes hidráulicos e areia siliciosa. Destaca-se ainda as elevadas resistências mecânicas obtidas, em geral, por estes edifícios.

Relativamente ao Teatro Nacional São João, verificou-se também que o facto de prevalecer em toda a fachada argamassas armadas, incluindo os ornamentos e figuras decorativas, terão contribuído para a fissuração e destacamento do revestimento do edifício.

No desenvolvimento de argamassas de substituição, realizaram-se formulações procurando uma boa compatibilidade química e mecânica com as existentes. De modo a privilegiar argamassas idênticas, foi escolhido o cimento natural como base a estas formulações, sabendo que terá sido o ligante emergente na época de construção dos edifícios em estudo. Conclui-se que a formulação V_Ca1 é detentora de boas características a este nível possibilitando a reabilitação de revestimentos desta época.

Como trabalhos futuros é sugerido a realização de outros ensaios que complementem a caracterização de argamassas antigas. O ensaio de porosimetria de mercúrio torna-se importante deste âmbito, pois permite analisar um conjunto de propriedades de estruturas sólidas por intrusão de mercúrio. Possibilitando obter dados como a distribuição de tamanhos de poros bem como as densidades de amostras. Este ensaio também possui interesse na caracterização de novas argamassas.

Na continuação deste trabalho, surge também como interesse a realização de ensaios para além dos 28 dias de cura, possibilitando um estudo mais aprofundado do comportamento do cimento natural relativamente ao seu desempenho. Do mesmo modo, teria importância a realização de novas formulações com outros traços e outros cimentos naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bayer, K., Starinieri, V., Hughes, D. C., Gosselin, C., & Wilk, D. (2013). *Pre-hydration as a technique for the retardation of Roman cement mortars*. *Cement and Concrete Research*, 46, 1–13. doi:10.1016/j.cemconres.2013.01.004
- Braga, C. (2009). *Imagem de Autoria Colectiva : O Mercado do Bolhão como criador de imagens fotográficas*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Design de Imagem na Universidade do Porto.
- Charola, A., & Henriques, F. M. A. (2000). *Hydraulicity in Lime Mortars Revisited* (pp. 95–104). International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests : Paisley, Escócia , 12-14 Maio, 1999: RILEM , Cachan ; 2000.
- Coutinho, S. (1997). *Fabrico e propriedades do betão Volume II*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Duarte, C., Frade, D., Sardinha, G., Garcia, J., Costa, J., & Gonçalves, P. (2009). *Argamassas de Reboco e Monomassas, Monografias APFAC*. Lisboa.
- Drdácký, M., Mašín, D., Mekonone, M. D., & Slížková, Z. (2008, September). *Compression tests on non-standard historic mortar specimens*. In Book of Abstracts “HMC08 1st Historical Mortars Conference”, LNEC, Lisbon (p. 53).
- Elsen, J. (2006). *Microscopy of historic mortars—a review*. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1416–1424. doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.006
- Elsen, J., Callebaut, K., Balen, K. Van, & Viaene, W. (2001). Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael ’ s Church (Leuven , Belgium) Natural hydraulic lime or cement ?, 31, 397–403.
- Faria, P. (2012). *Argamassas Sustentáveis* (pp. 1–12). 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, 26 e 27 Abril, Lisboa.

Costa, A. F. (2013). *Revestimentos compatíveis para alvenarias antigas sujeitas a ação severa da água*. Universidade de Aveiro. Tese de doutoramento.

Freire, T., Silva, A. S., Veiga, M. R., & Brito, J. de. (2008). *Characterization of Portuguese Historical Gypsum Mortars*. Historic Mortars Conference, LNEC, Lisboa, 24 a 26 Setembro.

Heinemann, H. A. (2013). *Historic Concrete: From Concrete Repair to Concrete Conservation* (pp. 61–87).

Hughes, D., Bayer, K., Gurtner, C., Kozłowski, R., Swann, S., Schwarz, W., & Weber, J. (2002). *Roman Cement* (Vol. 5). European Commission Research Project: ROCEM.

Hughes, D., Weber, J., Bd, B., & Kozłowski, R. (2010). *Roman cements - key materials of the built heritage of the nineteenth century*. (Á. T. (Eds. . M. Bo tenaru Dan, R. P ikryl, Ed.). Springer: Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures.

IGESPAR. (n.d.). IGESPAR - Património. Retrieved from <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/>

Lea, F. M. (1970). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London: Edward Arnold.

Lopes, R. P. N., & Ribeiro, L. (2007). *As Argamassas na Antiguidade Greco-Romana : usos , definições e traduções*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 22 e 23 Novembro, Lisboa.

Martins, A. (n.d.-a). IGESPAR - *Palácio da Bolsa*. Retrieved November 20, 2013, from <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/geral/patrimonioimovel/detail/70402/>

Martins, A. (n.d.-b). IGESPAR - *Teatro Nacional São João*. Retrieved from <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/geral/patrimonioimovel/detail/74813/>

Martins, A. (n.d.-c). IGESPAR - *Mercado do Bolhão*. Retrieved from <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/geral/patrimonioimovel/detail/155837/>

- Moe, M., Lukacs, J., & Hansen, T. S. (2010). Oscarshall (Oslo , Norway) - *Case Study of the Restoration of a Natural Cement Rendered Facade* from 1849 (pp. 673–681). 2nd Historic Mortars Conference HMC10 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September, Prague, Czech Republic.
- Moropoulou, A., Maravelaki-Kalaitzaki, P., & Bakolas, A. (2003). *Physico-chemical study of Cretan ancient mortars*. Cement and Concrete Research, 33(5), 651–661.
doi:10.1016/S0008-8846(02)01030-X
- Oscarshall. (s.d.). kongehuset.no - *Building Oscarshall Summer Palace*. Retrieved from <http://www.kongehuset.no/artikkel.html?tid=80429&sek=80425>
- Paulo, R. S. (2006). *Caracterização de Argamassas Industriais*. Dissertação elaborada para obtenção de Grau de Mestre em Materiais, Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos na Universidade Aveiro.
- Pintér, F., Vidovszky, I., Weber, J., & Bayer, K. (2013). *Mineralogical and microstructural characteristics of historic Roman cement renders from Budapest, Hungary*. Journal of Cultural Heritage, 4–11. doi:10.1016/j.culher.2013.04.007
- ROCARE. (2010). Rocare - *Roman Cement for architectural restoration to new high standards*. Retrieved from <http://www.rocare.eu/page/seite,roman-cement.html>
- Rodrigues, M. P. F. F. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Dissertação para obtenção de grau de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado pela Universidade Nova de Lisboa.
- Sequeira, A. C., Frade, D., & Gonçalves, P. (2007). *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Serenó, I. (1996). *Sistema de Informação para o Património Arquitectónico (SIPA) - Mercado do Bolhão*. Retrieved from http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5473

- Sereno, I., & Santos, J. (1994). *Sistema de Informação para o Património Arquitectónico (SIPPA) - Teatro de São João*. Retrieved November 16, 2013, from http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5524
- Silva, F. M. da. (n.d.). Fundação Instituto Marques da Silva. Retrieved November 20, 2013, from <http://fims.up.pt/index.php?cat=45&subcat=2>
- Silva, N.G. e Campiteli, V.C., (2008). *Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35, out./dez.
- Tavares, M. V., Aguiar, J., & Veiga, R. (2005). *Uma metodologia de estudo para a conservação de rebocos antigos - o restauro através da técnica de consolidação*. VI Seminário brasileiro de tecnologia das argamassas, Florianópolis, Maio.
- Teixeira, M. C. (1993). *A historia urbana em Portugal. Desenvolvimentos recentes*. (pp. 371–390). Instituto Ciências Sociais da Universidad de Lisboa. Retrieved from <http://www.jstor.org/discover/10.2307/41010983?uid=3471496&uid=3738880&uid=368665151&uid=2&uid=3&uid=3471304&uid=67&uid=62&sid=21103028329661>
- Varela, N., & Vieira, F. S. (2005). *Cimento : Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Veiga, R. (1998). *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes : contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Dissertação elaborada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- VEIGA, M. Rosário (2003) – *Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes*. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio
- Veiga, R., & Carvalho, F. (2002). *Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos: Requisitos e características a respeitar*, Caderno de edificios 2 (pp. 39–55). LNEC, Lisboa.

- Velosa, A., Grilo, J., Santos Silva, A., Faria, P., Gameiro, A., & Veiga, R. (2013). *Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions*. Construction and Building Materials, 51, 287–294. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045
- Velosa, Ana. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Universidade de Aveiro. Tese de doutoramento. Retrieved from <http://ria.ua.pt/handle/10773/2407>
- Velosa, Ana, Rocha, F., Haugen, A., & Hole, E. (2013). *Teatro Nacional de S . João (Porto , Portugal) . Mortar characterization in early 20th Century Architecture . 3rd Historic Mortars Conference, 11-14 September, Glasgow, Scotland*.
- VICAT. (n.d.). *What is cement? / Cement / Activities / Vicat Group / Sites - Groupe Vicat*. Retrieved November 20, 2013, from <http://www.vicat.com/en/Activities/Cement/What-is-cement>
- Wilk, D., Bratasz, Ł., & Kozłowski, R. (2013). *Shrinkage cracking in Roman cement pastes and mortars*. Cement and Concrete Research, 53, 168–175. doi:10.1016/j.cemconres.2013.03.012